

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Ingeniería Técnica Industrial Especialidad en Electrónica Industrial

PROYECTO Fin de Carrera

TÍTULO	ESTUDIO DE PRINCIPIO FÍSICO, FUNCIONAMIENTO Y CONTROL DE LUMINARIAS LED Y CREACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA ILUMINACIÓN ESCÉNICA
AUTOR	JESÚS MARCOS GÓMEZ
DIRECTOR	D. ANTONIO COLMENAR SANTOS
DEPARTAMENTO	INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE CONTROL

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
CONTROL

TÍTULO	ESTUDIO DE PRINCIPIO FÍSICO, FUNCIONAMIENTO Y CONTROL DE LUMINARIAS LED Y CREACIÓN DE UN PROTOTIPO PARA ILUMINACIÓN ESCÉNICA
AUTOR	JESÚS MARCOS GOMEZ
DIRECTOR	D. ANTONIO COLMENAR SANTOS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

(A rellenar por el Tribunal Calificador)

TRIBUNAL CALIFICADOR

PRESIDENTE: _____

VOCAL _____

SECRETARIO _____

FECHA DEFENSA ____ de _____ de _____

CALIFICACIÓN _____

Vocal	Presidente	Secretario

Fdo.: _____ Fdo.: _____ Fdo.: _____

CÓDIGOS UNESCO

ÍNDICE

Lista de símbolos	vi
CAPITULO 1 – INTRODUCCION	1
CAPITULO 2 - INTRODUCCION HISTORICA.....	2
CAPITULO 3 – VISIÓN, FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA.....	6
3.1 Visión humana.....	6
3.2 Fotometría.....	8
3.3 Colorimetría.....	14
3.4 Reproducción cromática.....	18
CAPITULO 4 – TIPOS DE LUMINARIAS Y ECONOMÍA DE LA LUZ.....	28
4.1 Bombillas y tubos.....	28
4.1.1 Lámparas de filamento incandescente.....	28
4.1.2 Lámparas halógenas de tungsteno.....	30
4.1.3 Lámparas de descarga a baja presión.....	31
4.1.4 Lámparas de descarga a alta presión.....	35
4.2 Economía de la luz.....	38
CAPITULO 5 – DIODO EMISOR DE LUZ.....	40
5.1 Diodos y semiconductores.....	40
5.2 Las bandas de energía y barrera de energía.....	46
5.3 La curva característica del diodo.....	51
5.4 Materiales semiconductores para LEDs de alto brillo.....	53
5.5 Soporte físico y contactos.....	56
5.6 Modelos eléctricos.....	58
5.7 Efectos de la temperatura.....	60
5.8 Patrones de radiación.....	60
5.9 Eficiencia y eficacia.....	62
5.9.1 Aspectos generales.....	62
5.9.2 Optimización de la luz blanca. acuerdo entre eficacia y reproducción cromática.....	65
5.10 Tipos de LEDs.....	65
CAPITULO 6 – SISTEMAS DE ILUMINACION LEDs.....	68
6.1 Sistemas de alimentación y control: drivers.....	69
6.2 Sistemas de control para LED.....	74
6.2.1 Modulación en frecuencia.....	75
6.2.2 PWM.....	76
6.2.3 Modulación por ángulo de bit.....	76
6.2.4 Protocolos de control LED.....	77
6.2.5 Seguridad en el parpadeo o flicker.....	84
6.3 Disipación del calor.....	88
6.3.1 Concepto y formas de disipación.....	88

6.3.2 Diseño y uso correcto del disipador.....	89
6.3.3 Rendimiento de los disipadores.....	93
 CAPITULO 7 – APLICACIONES DE LUMINARIAS EN ESTADO SÓLIDO.....	95
 CAPITULO 8 – MONTAJE EXPERIMENTAL: MAFILED.....	99
8.1 Punto de partida: MafiLUX.....	101
8.2 Uso al que se destina el dispositivo.....	103
8.3 Especificaciones.....	103
8.4 Componentes.....	103
8.4.1 Bombillas LED.....	112
8.4.2 Disipador.....	114
8.4.3 Ventilador.....	116
8.4.4 Driver.....	118
8.4.5 Fuente de alimentación.....	119
8.5 Diseño y montaje.....	119
8.5.1 Diseño.....	119
8.5.2 Montaje y conexión.....	119
8.6 Mediciones y resultados.....	124
8.7 Presupuestos.....	134
8.8 Mejoras.....	135
8.9 Otras alternativas comerciales.....	135
 CAPÍTULO 9 - BIBLIOGRAFÍA	
 APÉNDICES.....	
 <i>Curriculum Vitae</i> del autor	

LISTA DE SÍMBOLOS

CI	Circuito Integrado
HBLED	High-Brigthness Light Emitting Diode
HPLED	High-Power Light Emitting Diode
LED	Light Emitting Diode
DP	Director del proyecto
ETSII	Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales
PFC	Proyecto Fin de Carrera
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN

El presente Proyecto de Fin de Carrera se desarrolla gracias a la coincidencia de las buenas sinergias que se presentan durante la asistencia a unas jornadas sobre patentes, organizadas por la oficina de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), a la que asiste don Marco Fidel Vargas Ramos, estudiante de Trabajo Social en la UNED e inventor de un sistema de iluminación para la escena, denominado “MAFILUX”. En estas jornadas se ponen en conversaciones con Don Sixto Jansa, Director de la OTRI y le expone su interés por investigar en la mejora del rendimiento del sistema en cuanto a ahorro en consumos, duración de las luminarias, reducción de producción de calor en grados centígrados, ahorro en lámparas y mejora en la duración de las mismas.

Don Sixto Jansa, aprovecha la ocasión y presenta a Don Antonio Colmenar Santos, Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control y a Don Marco Fidel Vargas Ramos. Se decide estudiar la posibilidad de colaboración al tratarse de una investigación que lleva además un fundamento de carácter solidario a favor de la infancia y una idea clara de buscar solución a un problema que se presenta en las entrañas de la iluminación escénica.

Se parte de Mafilux, una luminaria pensada en dar solución al problema de la falta de iluminación en las zonas interiores de trabajo de los espacios escénicos. Se han desarrollado luminarias para el lucimiento de los artistas y de los espectáculos, obviando las necesidades de iluminación para los técnicos durante los procesos de montaje y también para los artistas durante la ejecución de los eventos en los que las zonas interiores de la escena se queda prácticamente a oscuras, prevaleciendo la escena sobre estas zonas de paso y desembarco de las actuaciones, tanto de artistas, como técnicos y materiales que juegan en la escena.

La solución aportada por el Mafilux en su momento y contrastada con los técnicos de diferentes compañías de teatro, danza, música, conciertos, televisión, pases de modelo, convenciones, zarzuela y otros tipos de eventos, fue buena en su momento y ahora se detectan carencias que pueden ser resueltas con las nuevas tecnologías y los avances con respecto a las fuentes productoras de luz.

Durante la presentación del sistema de iluminación en la cátedra presidida por Don Antonio Colmenar, Don Marco Fidel Vargas Ramos, comenta en una exposición posterior las siguientes carencias o deficiencias del mismo que le gustaría que se pudiesen solucionar:

- Cambio del sistema de las luminarias.
- Mejora en cuanto a la generación de calor en grados centígrados.
- Implementar sistema de color, generación de los diferentes colores RGB.
- Gobernabilidad de las luminarias bajo el protocolo DMX 512, universalmente utilizado en el mundo de la escena.
- Control de la intensidad de cada luminaria independientemente y posibilidad de agrupar diferentes cantidades.

- Trabajar en la generación de una única zona de reflexión de la luz, que además sea aprovechable el trabajo de las palas de la luminaria.
- Ahorro en cuanto a consumo energético.
- Mayor duración de los generadores de luz.
- Pensar en el sistema como una luz pensada en la seguridad.

Posteriormente Don Antonio Colmenar, designa como trabajo de fin de carrera la mejora del sistema de iluminación, Mafilux a Don Jesús Marcos Gómez, alumno de Ingeniería Técnica Industrial especialidad en Electrónica Industrial y pone en contacto con Don Marco Fidel Vargas Ramos, con quien conecta inmediatamente en la idea del trabajo que se le ha encomendado y se propone mantener una serie de reuniones durante el proceso de su trabajo de investigación.

Este trabajo se enmarca dentro de un proceso amplio que incorpora el carácter de la Cooperación Internacional realizado por la ONG Ben por la Infancia (bajo las siglas ABENIN y espacio WEB: www.ongabenin.org). Esta organización recibió en concepto de donación cualquier beneficio que pueda generar el sistema de iluminación Mafilux, fondos que se destinan a la labor en favor de los derechos de la infancia dentro de un proyecto denominado Escuela Internacional Solidaria de Artes Escénicas “EISAE”. WEB en construcción:

http://participa.alcobendas.org/index_web.php?idwc=czo2OiJhYmVuaW4iOw==&idn=a5e0ff62be0b08456fc7f1e88812af3d

La Coordinación de la escuela a nivel internacional corre a cargo de Doña Lorena Ramos Pérez, que incorporará el trabajo en el proyecto EISAE. Se decide trabajar bajo este prisma y en total acuerdo en lo que se va a denominar “MAFILED”.

Se procede a la organización del trabajo y en los sistemas de comunicación, ya que la distancia Alcobendas, Madrid – Pamplona, de donde es quien escribe, es considerable. Por tanto se utiliza el correo electrónico como medio de comunicación escrito, y el programa Skype como forma de comunicación con imagen y oral en tiempo real, teléfonos y una serie de entrevistas personales para ir viendo los avances.

Asimismo, se mantienen contactos con algunas empresas del sector. A pesar de percibir el aguijón de la crisis, se encuentra afortunadamente el apoyo de la gran empresa de iluminación y la ingeniería escénica “Stonex S.L.”, aportando los consejos de sus ingenieros e incluso apoyo en forma de material para las prácticas que se detallará a lo largo de este proyecto.

Dentro de los contactos que se han realizado, se destaca la participación de Don Manuel León, Jefe de Iluminación en el Teatro Español del Ayuntamiento de Madrid, con quien se comprueban algunos de los resultados del Mafiled, en las instalaciones del Matadero en Madrid.

Agradecimiento a:

- Manuel León – Teatro Español de Madrid.
- Antonio Blanco Magdalena – PSC Ayuntamiento de Alcobendas CC. la Esfera de Alcobendas
- Isaac Puigmijta Cob – Teatro Auditorio de Alcobendas.
- Manuel Prexigueiro F. - Teatro Auditorio de Alcobendas.
- Miguel González Juanes - Teatro Auditorio de Alcobendas
- Luis Blanco Magdalena – Iluminación MEC Teatro Valle Inclán.
- Jose Luis Seoane – Stonex SL.
- Ezequiel Nuvilli – Stonex SL
- Lorena Ramos Pérez – EISAE.
- Don Sixto Jansa, Director de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI)
- Don Antonio Colmenar Santos, Director del Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control (DIEEC)

CAPITULO 2 - INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Para introducir el tema, se va a presentar una introducción a la tecnología de las distintas formas de iluminación. Toda luz es producida por transiciones electrónicas de más alto a menor estado de energía. Generalmente, la historia de la iluminación describe descubrimientos de mayores eficiencias y más convenientes métodos de excitación, radiación y recombinación. Sin embargo, con la excepción de los dos últimos siglos, la falta de conocimientos básicos resultó en avances extremadamente lentos y sin mucha relevancia en la vida cotidiana de la sociedad.

Hasta el comienzo del siglo XIX, la llama producida por combustión era la única forma de luz artificial. Esta piroluminiscencia es debida a transiciones radiactivas entre átomos excitados e iones, recombinaciones de iones para formar moléculas y la incandescencia de las partículas sólidas en la llama.

La primera fuente de luz artificial fue el fuego utilizado universalmente hace 500.000 años, siendo un trozo de madera en llamas la primera fuente portátil de luz, la antorcha. El siguiente descubrimiento importante fue el de un trozo de fibras en una base de grasa fundida, que se conoció como mecha. La mecha fue el componente clave para la aparición de las lámparas de aceite, usadas hace más de 30.000 años, hechas inicialmente de piedra (figura 2.1).



Figura 2.1 Lámpara de aceite

Más tarde, empezaron a construirse de cerámica y de metales, pero sin desarrollar el combustible. A finales del siglo XVIII, Ami Agrand of Geneva la mejoró colocando una chimenea de cristal alrededor de la llama y una llave para controlar el suministro de aire y, de esta manera, poder regular la intensidad (figura 2.2).

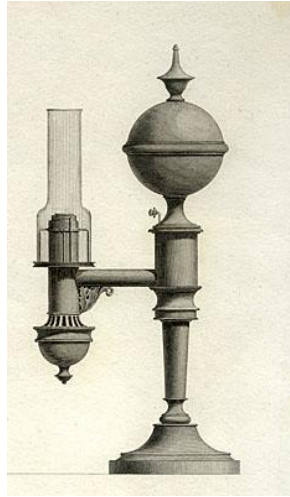


Figura 2.2 Lámpara de Ami Agrand

La iluminación por gas se introdujo en 1772 por el inventor escocés William Murdoch. A comienzos del siglo XIX la iluminación por combustión de gas fue rápidamente instalado en las ciudades para iluminación de interior en casas e industrias y en la iluminación urbana. Durante más de un siglo, esta forma de iluminación avanzó desarrollando una infraestructura que permitía la distribución, suministro y el mantenimiento.

El primer sistema de iluminación de estado sólido fue la lámpara de luz de cal. El dispositivo consiste en un cilindro de cal (óxido cálcico) que es llevado a un estado de deslumbrante brillantez por la llama de un soplete.

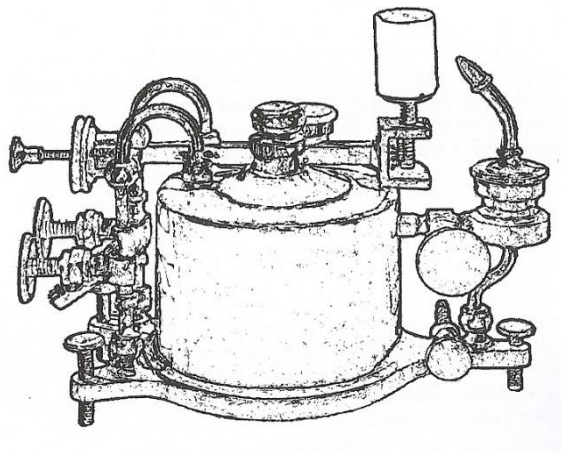


Figura 2.3 Lámpara de llama, el primer dispositivo de luz de estado sólido

En esta emisión de luz sucede un nuevo fenómeno: candoluminiscencia, que es el término (arcaico), usado para describir la luz emitida por ciertos materiales que se han calentado hasta quedar en estado incandescente y emiten luz de longitud de onda más corta de lo que cabría esperar de un típico radiador de cuerpo negro. La luz de cal fue

usada en teatros en las décadas de 1860 y 1870 hasta que fue sustituida por la electricidad.

La mayoría de los principios de iluminación eléctrica fueron descubiertos a principios del siglo XIX, cuando Sir Humphry Davy demostró la descarga entre dos barras de carbón y el brillo de una parte del cable calentada por la corriente eléctrica. El cambio de la llama a la electricidad ocurrió cuando apareció el generador de corriente continua (dinamo) en la década de 1870. Paul Jablochhoff fabricó el primer dispositivo práctico de iluminación eléctrica en 1876, consistente en dos barras de carbón separadas por una fina capa de aislante de yeso que se deshacía cuando el carbón se calentaba mucho.

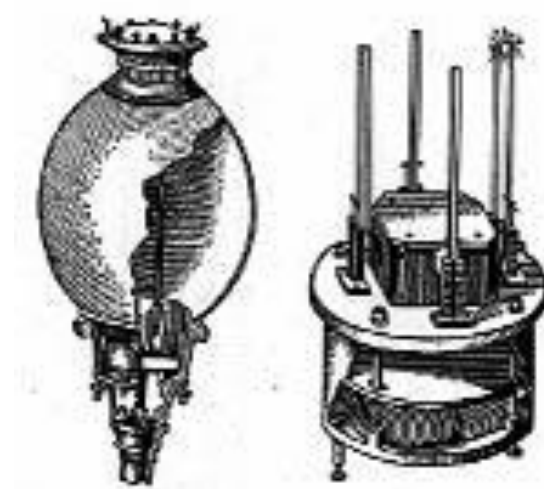


Figura 2.4 Bombilla de Jablochhoff , primer dispositivo de iluminación eléctrico

Tenía muy poca vida útil (unas pocas horas), pero fue aplicado inmediatamente a la iluminación urbana y dio buena fama a la iluminación eléctrica.

Thomas Alva Edison y Joseph Wilson Swan fueron los más exitosos inventores de la lámpara de filamento incandescente. Edison inventó la bombilla de filamento a finales de 1879, y también el primer sistema de distribución eléctrica. Sus sistemas de iluminación de filamento incandescente empezaron a comercializarse y esto generó la creación de las grandes empresas de la electricidad e iluminación actuales: General Electric, AEG, Siemens, y Philips. Se hicieron grandes esfuerzos en sustituir los filamentos de carbón por materiales que pudieran operar a temperaturas mayores y sin degradación que oscureciera el cristal y aparecieron los filamentos de osmio, tantalio y finalmente, tungsteno. El diseño de la actual bombilla de tungsteno básicamente se hizo en los primeros 30 años del siglo XX.

Paralelamente, durante el siglo XIX se investigaba en lámparas de descarga de gases a baja presión. El funcionamiento de una lámpara de descarga se basa en el fenómeno de la luminiscencia, por el cual se producen radiaciones luminosas con un escaso aumento de la temperatura, por lo que se las llama lámparas frías. A comienzos del siglo XX Peter Cooper Hewitt descubría la lámpara de vapor de mercurio, que emitía luz azul

verdosa, lo que distorsionaba los colores percibidos. Sin embargo, mostraban una eficiencia mucho mayor que la lámpara de filamento incandescente. Para resolver este problema de los colores se acostumbra a añadir sustancias fluorescentes que emitan en la zona del espectro rojo. De esta manera se mejoran las características cromáticas de la lámpara.

A finales de la década de 1990, en el amanecer de los dispositivos semiconductores de iluminación, la mayor parte de la iluminación de las casas es proporcionada por bombillas incandescentes de tungsteno, las lámparas fluorescentes son altamente promocionadas por su elevada eficiencia, lo que hace que sea utilizada en muchos entornos de trabajo y la iluminación urbana es dominada por las lámparas de vapor de sodio. Sin embargo, todo esto va a cambiar por el explosivo descubrimiento de la iluminación en estado sólido basada en los diodos emisores de luz (LEDs: light emitting diodes) de alto brillo visible.

CAPITULO 3: VISION, FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA

En este capítulo se ofrecerá una pequeña base sobre la visión, fotometría y colorimetría con los aspectos básicos más importantes para la iluminación en estado sólido.

3.1 VISIÓN HUMANA

La visión es un proceso complejo de varias etapas que se llevan a cabo cuando cambia el patrón de luz y cromaticidad. Las propiedades de la visión determinan la cantidad y calidad de luz requerida.

El proceso primario de ver ocurre en el ojo, donde la imagen es proyectada en la retina. La retina consta de celdas receptoras que convierten la energía de la luz en impulsos nerviosos. Los receptores son de dos tipos: bastones y conos. Los bastones tienen mayor sensibilidad y juegan un papel importante en la visión nocturna, cuando el ojo se adapta a la oscuridad (visión escotópica). Sin embargo, los bastones no son capaces de distinguir entre colores porque, como puede verse en la figura 3.1 son sensibles al color azul del espectro (y por ende, ciegos al rojo). No es posible una discriminación del color en este tipo de visión: es una visión monocromática.

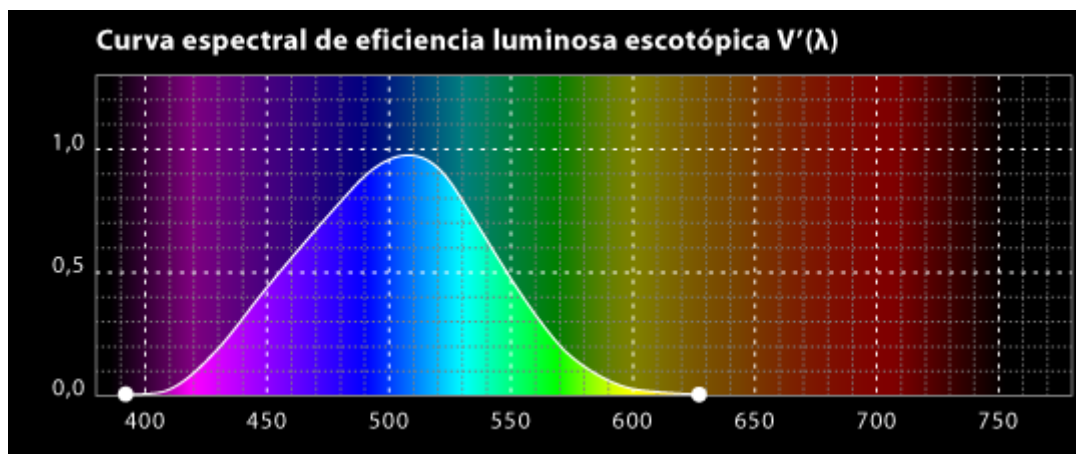


Figura 3.1. Espectro de eficiencia luminosa para la visión escotópica.

En condiciones de alta luminosidad la respuesta de los bastones se satura y la visión se realiza por los conos receptores (visión fotópica). Existen tres tipos de conos: rojos (conos L), verdes (conos M) y azules (conos S). Cada uno de ellos posee un fotopigmento con una curva característica de absorción respecto de la longitud de onda que les llegue y que puede verse en la figura 3.2. Este hecho constituye el punto de partida fisiológico para la percepción del color.

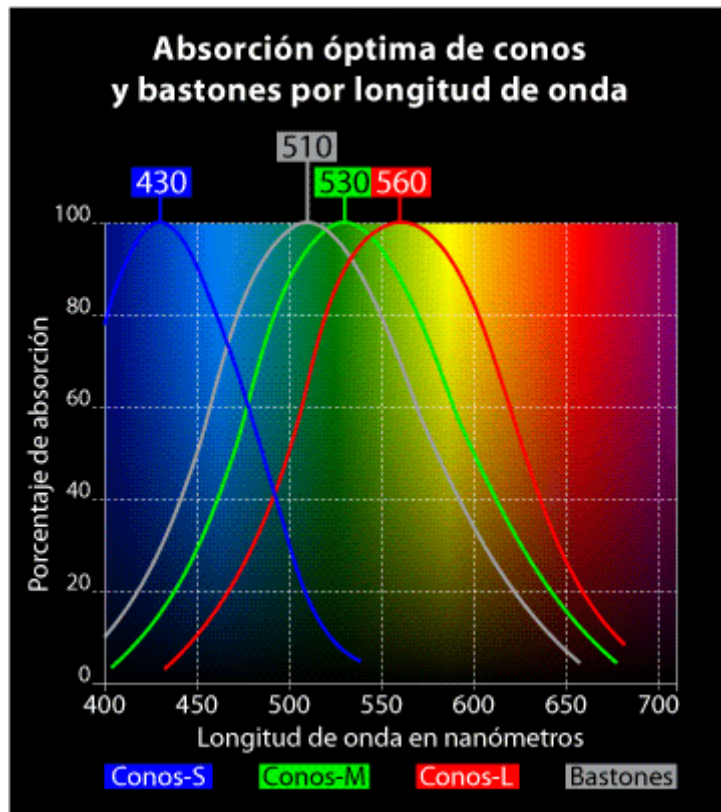


Figura 3.2 Absorción óptica de conos y bastones por longitud de onda.

La agudeza visual, la percepción de detalles finos en las imágenes, es superior en la visión fotópica. En primer lugar, esto se debe al denso empaquetamiento de los conos en la fovea. En segundo lugar, a que las salidas de varios bastones adyacentes suelen converger en una única neurona, lo que aumenta la sensibilidad a la intensidad luminosa de este tipo de células pero reduce su capacidad de resolver detalles. En la figura 3.3 puede verse la curva espectral de eficiencia luminosa para la visión fotópica.



Figura 3.3 Espectro de eficiencia luminosa para la visión fotópica.

La mayoría de actividades humanas se desarrollan mediante visión fotópica, lo que hace que sea la más importante desde el punto de vista de iluminación.

3.2 FOTOMETRÍA

La luz es un tipo de radiación en forma de ondas electromagnéticas que hacen posible la visión al ojo humano. La radiación electromagnética puede ser clasificada por su longitud de onda (λ) o por su frecuencia (figura 3.4); la radiación infrarroja (IR) y la ultravioleta (UV) no son visibles para el ojo humano. Aunque se incluyen algunas veces en la categoría de luz, lo correcto es llamarlas radiaciones. El rango visible se considera entre 380 nm y 780 nm. Fuera de este rango la radiación empieza a hacerse invisible.

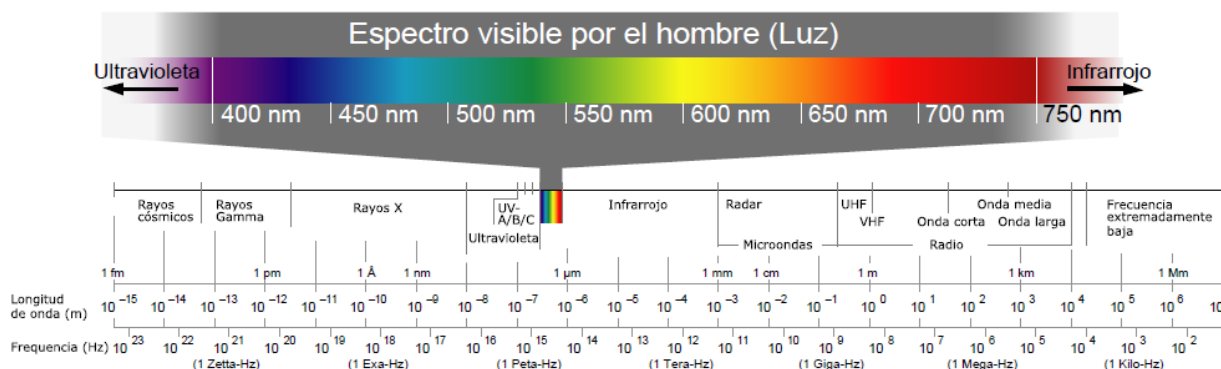


Figura 3.4 Ubicación de la luz en el espectro electromagnético.

Adaptado de: Wikipedia en español

La radiometría se encarga de medir las radiaciones electromagnéticas en términos de potencia absoluta. Las unidades radiométricas están dadas en vatios (W), julios (J) y unidades derivadas, mientras que las fotométricas están dadas en lúmenes (lm), candelas (cd) y unidades derivadas.

La fotometría es la rama de la óptica que se encarga de medir la luz¹, y desde su contexto se define como el brillo percibido por el ojo humano. En otras palabras, la fotometría estudia la capacidad que tienen algunas radiaciones electromagnéticas de estimular el sistema visual humano.

El campo de estudio de la radiometría abarca todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, al contrario de la fotometría, que solo se ocupa del espectro visible. Para cuantificar las características de una fuente de luz artificial generalmente se utilizan las unidades de medida fotométricas, aunque implícitamente se hace uso de algunas unidades radiométricas.

¹ También existe la fotometría en astronomía, que estudia el brillo de los diferentes astros.

1. UNIDADES RADIOMÉTRICAS

- Flujo radiante

Es la medida de la potencia de una radiación electromagnética (incluyendo los infrarrojos, ultravioletas y la luz visible). Es la energía que transportan las ondas por unidad de tiempo. Esta potencia puede ser la total emitida por una fuente o la total que llega a una superficie determinada.

La unidad del Sistema Internacional de Unidades (SI) para el *flujo radiante* es el vatio (W), que indica la energía por unidad de tiempo o, utilizando unidades del SI, los julios por segundo. Así, si tenemos una fuente de radiación que tiene un *flujo radiante* de 1 W, significa que emite 1 julio de energía cada segundo.

- Intensidad radiante

En radiometría, la intensidad radiante es la medida de intensidad de la radiación electromagnética y está definida como potencia por unidad de ángulo sólido, con unidades de vatio sobre estereorradián (W/sr). El estereorradián (sr) es la unidad derivada del SI que mide ángulos sólidos (espacio limitado por una superficie cónica). Un estereorradián es el ángulo que cubre una superficie r^2 , a una distancia r del vértice en una esfera de radio r , como se aprecia en la siguiente figura:

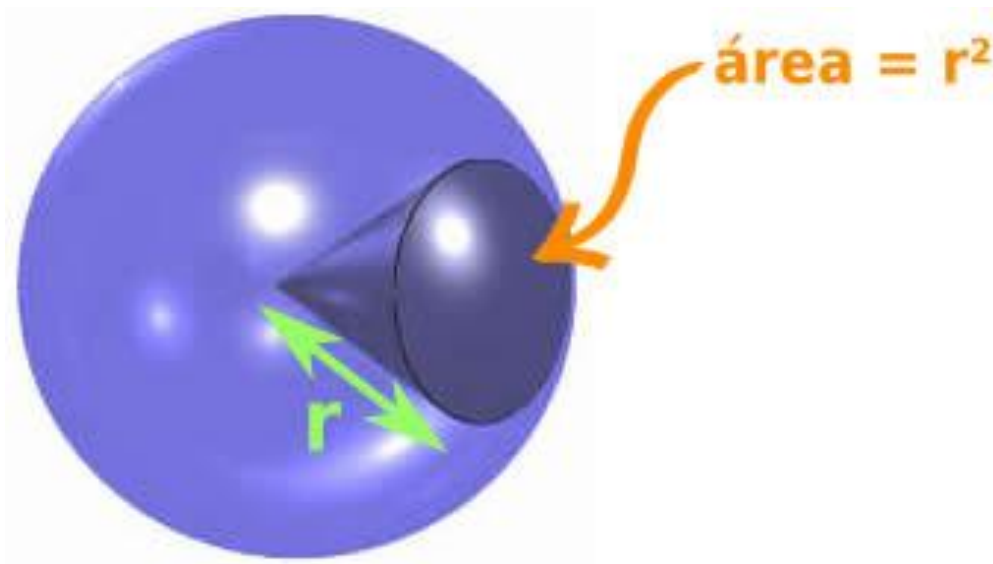


Figura 3.5 Definición de un estereorradián

2. UNIDADES FOTOMÉTRICAS

- Flujo luminoso

El flujo luminoso está relacionado con la distribución espectral del flujo radiante, conocido como SPD (*Spectral Power Distribution*) a través de la curva de eficiencia luminosa $V(\lambda)$ (figuras 3.1 y 3.3 curvas de eficiencia para visión estocópica y fotópica). Su unidad de medida en el SI es el lumen (lm)

Un lumen es el flujo luminoso contenido en un estereorradián de una fuente de luz uniforme que tiene una intensidad luminosa de una candela (figura 3.6).

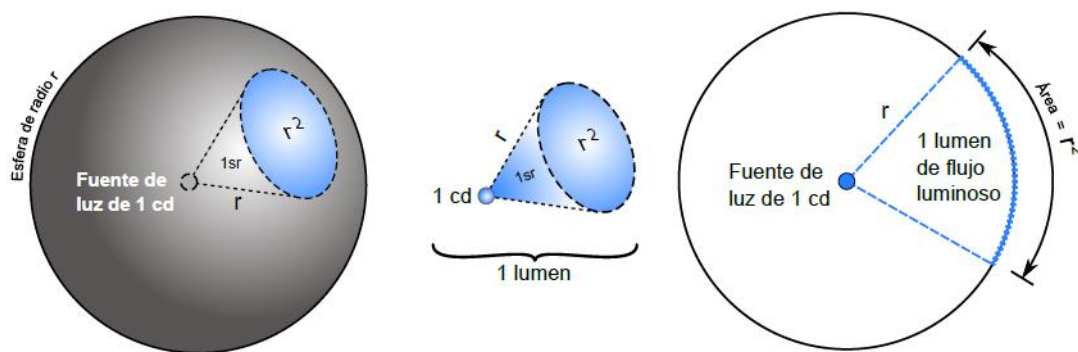


Figura 3.6. Definición gráfica de 1 lumen

La candela es una de las siete unidades básicas del SI y se usa para medir la magnitud física de la intensidad luminosa. Una candela es la intensidad luminosa de una fuente que emite radiación monocromática en una dirección dada de frecuencia 540 THz (555 nm, color verde) y cuya intensidad radiante en dicha dirección es $\frac{1}{683}\text{ W/sr}$.

- Intensidad luminosa

Es el flujo luminoso que emite una fuente por unidad de ángulo sólido. Su unidad de medida en el SI de Unidades es la candela (cd). Matemáticamente, su expresión es la siguiente:

Donde:

- es la intensidad luminosa, medida en candelas o lumens por estereorradianes (lm/sr)
- es el flujo luminoso, en lúmenes
- es la densidad espectral de la intensidad radiante.
- es el elemento diferencial de ángulo sólido, en estereorradianes.

A la relación entre vatios y lúmenes se le llama equivalente luminoso de energía. Empíricamente se demuestra que a un cuerpo negro que emite una radiación con longitud de onda igual a 555 nm y con una potencia de 1W le corresponden 683 lm. Por tanto:

$$1$$

Se puede interpretar el lumen de forma menos rigurosa como una medida de la "cantidad total de luz visible" en un ángulo determinado, o emitida por una fuente dada. El concepto de intensidad luminosa no es directamente aplicable a muchas fuentes de luz ya que no pueden ser tratadas como puntuales. Nos falta un concepto fotométrico para estas fuentes.

- Iluminancia

La iluminancia es la cantidad de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie, por unidad de área; también se conoce como nivel de iluminación (figura 3.7). Es importante destacar que el ojo humano solo ve luminancias, no iluminancias.

La unidad de medida para la iluminancia en el SI es el lux (lx):

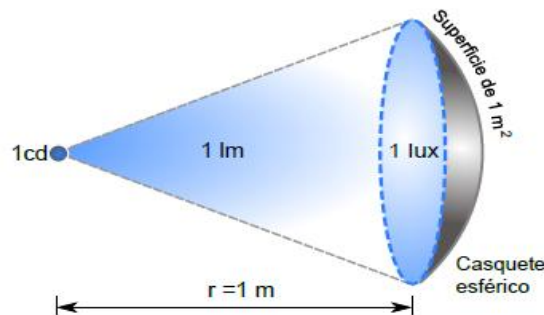


Figura 3.7 Definición gráfica de 1 lux.

- Eficacia y eficiencia luminosa

Como se muestra en la figura 3.8, en un sistema de iluminación no toda la energía es convertida en luz, se presentan pérdidas por radiaciones invisibles y por el calor generado en el dispositivo.

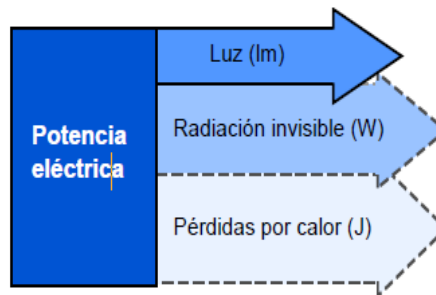


Figura 3.8 Pérdidas de energía en un sistema de iluminación.

La eficacia luminosa es la razón entre el flujo luminoso (lm) emitido por una fuente de luz y la potencia eléctrica (W) consumida por la misma; se representa por la letra K . Este parámetro describe la cantidad de luz que es capaz de proveer una fuente, a partir de cierta cantidad de electricidad; su unidad es el lumen/Watt (lm/W).

— — —

La eficacia máxima es 683 lm/W. Este valor se representa como K_m .

Para describir la eficiencia que tiene una fuente en convertir energía en luz, se introducen las eficiencias radiante y luminosa. La eficiencia radiante es un valor adimensional que indica la cantidad de potencia P que es convertida en flujo radiante:

La eficiencia radiante tiene un rango de 0 a 1. Es común que, por ser adimensional este valor, también se exprese como un porcentaje. Entonces, a una fuente de luz con eficacia radiante $K_m = 683$ lm/W (máxima eficacia posible) le corresponde una eficiencia del 100%, ya que toda su energía está siendo convertida en luz

La eficiencia luminosa es la capacidad de una fuente en convertir una potencia consumida en luz visible y se mide en lm/W:

Las aplicaciones prácticas de iluminación suelen utilizar la ILUMINANCIA. Cuanta más iluminancia haya, nuestro ojo humano tendrá mayor capacidad de distinguir detalles, contrastes y tonos de color.

OPTIMIZACIÓN DE LUMINARIAS BLANCAS EN ESTADO SÓLIDO.

La optimización de LEDs de luz blanca trata dos aspectos: El primero es el mismo que para LEDs de colores: alcanzar el más alto nivel de eficiencia lumínica maximizando la eficiencia cuántica interna y de extracción de luz. El segundo aspecto es la optimización de la distribución de potencia espectral (SPD) para alcanzar los valores máximos de eficacia e índice de reproducción cromática.

La distribución de potencia espectral (SPD) describe la potencia por unidad de área por unidad de longitud de onda de una iluminación, o más en general, la contribución por longitud de onda a cualquier cantidad fotométrica. Como hemos visto, es crucial para el cálculo del flujo luminoso. En la figura 3.9 se muestran SPD de una bombilla incandescente, de una bombilla fluorescente y del sol:

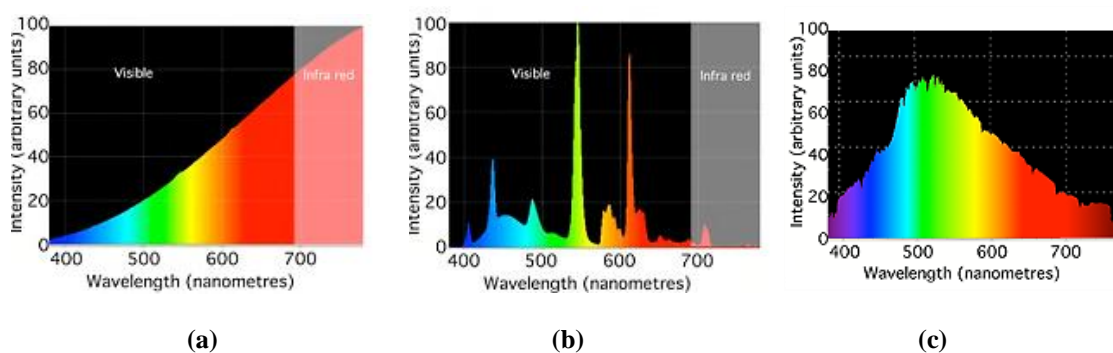


Figura 3.9 Distribución de potencia espectral SPD; a) bombilla incandescente; b) bombilla fluorescente; c) sol

En la figura 2.9 podemos apreciar que en la bombilla incandescente mucha potencia no es aprovechada en luz, ya que son radiaciones a longitudes de onda no visibles, mientras que la bombilla fluorescente muestra cómo la inmensa mayoría de la potencia es emitida a longitudes de onda visibles. También podemos apreciar cómo la longitud de onda a la que se emite más potencia es en el rojo, en el caso de la bombilla incandescente, y en el verde en el caso de la bombilla fluorescente.

Una reducción de las emisiones en las zonas del espectro con una pobre sensibilidad del ojo humano puede aumentar la eficacia por encima de 500 lm/W. Sin embargo, esta mejora en eficacia es alcanzada mediante un considerable empeoramiento de la reproducción cromática.

Como se estudiará a continuación, la luz blanca se obtiene por adición de otras fuentes de luz. La optimización de eficiencia y reproducción cromática es un problema sin solución general

3.3 COLORIMETRÍA

La colorimetría estudia la medida del color. La sensación del color es mucho más compleja que la sensación de brillo.

El índice de reproducción cromática es una medida cuantitativa de la capacidad de una fuente de luz para reproducir los colores de los objetos fielmente en comparación con una fuente de luz ideal o natural. Fuentes de luz con un CRI elevado son deseables en aplicaciones en las que el color sea fundamental, tales como la fotografía, la cirugía y cinematografía.

El CIE desarrolló CRI para indicar cómo se reproducían los colores iluminados por fuentes de luz fluorescentes y, en particular, de las lámparas de alta intensidad de descarga, y la mejor forma de corresponder a la percepción de la calidad del color de un ser humano. Debido a que la mayoría de los objetos no son de un solo color, sino una combinación de varios, las fuentes de luz que carecen de ciertos colores puede cambiar el color aparente de un objeto, efecto que se conoce como cambio de color.

Como regla general, dado un sistema, la eficacia K y el índice de reproducción cromática son algo incompatible, y debe de buscarse un acuerdo entre estas dos figuras de mérito.

Describir colores a partir de unas ciertas coordenadas surge de las leyes de Grassmann de que los colores pueden ser exactamente imitados por una combinación de solamente tres colores apropiados: Rojo, verde y azul. Esto se traduce en que es posible crear un color a partir de sumas de estos tres estímulos. Sin embargo, algunos colores próximos a ser monocromáticos, no se pueden reproducir con sumas de estos estímulos y necesitan valores negativos (resta de color).

Las tres características que determinan el color son el brillo, matiz y saturación. En este capítulo se mostrará el modo de representar el color mediante coordenadas con el fin de intentar representar la sensación del color de una forma objetiva.

1ª LEY: Por síntesis aditiva es posible conseguir todos los colores mezclando tres franjas del espectro visible en la proporción adecuada, siempre que ninguno de los tres iluminantes elegidos se pueda obtener por mezcla de los otros dos.

Para conseguir luz blanca con la mezcla de tres colores deben emplearse cantidades iguales de rojo verde y azul, aunque en el experimento de Grassmann no se utilizan iguales cantidades en términos de lúmenes sino en unidades tricromáticas. Las unidades T están relacionadas con los lúmenes de la siguiente forma:

1 unidad T de rojo = 0,30 lúmenes de rojo.

1 unidad T de verde = 0,59 lúmenes de verde.

1 unidad T de azul = 0,11 lúmenes de azul.

3 unidades T = 0,30+0,59+0,11 = 1 lumen de blanco.

2ª LEY: Cualquier radiación cromática que se mezcle aditivamente con otra, puede ser sustituida por otra radiación cromáticamente equivalente.

3ª LEY: Siempre que dos superficies nos produzcan la misma sensación cromática podemos variar su luminancia, manteniendo constante el matiz y la saturación, sin que varíe la igualdad cromática entre las dos superficies.

4ª LEY: Como cualquier color puede crearse por síntesis aditiva de los colores primarios y al hacer esto sumamos sus respectivas luminancias, podemos deducir que la luminancia de un color cualquiera equivale a la suma de las luminancias de sus componentes primarias.

Se tiene luz blanca que se quiere reproducir con la luz de un colorímetro. Este aparato contiene un difusor que emite luz regulable a partir de luz roja, verde y azul. Así, se superponen tres flujos de luz cuyas cantidades serán "h" de luz roja "y" de luz verde y "j" de luz azul. Si se llama X a la radiación blanca que se quiere analizar, se tiene:

$$f X = h R + i G + j B$$

A esta expresión se la denomina *ecuación tricromática*, donde f, h, i, y j son magnitudes fotométricas, cumpliéndose, según la cuarta ley de Grassmann:

$$f = h + i + j$$

h, i, j son los componentes tricromáticos de X.

A veces se necesitará añadir un primario a la luz que se desea analizar para poder igualar los dos sectores del ocular. Con esto se introduce el concepto de resta del color, o un color negativo:

$$f X + j B = h R + i G$$

$$f X = h R + i G - j B$$

Aplicando la tercera ley de Grassmann a la ecuación tricromática:

$$\frac{f X}{f} = \frac{h R}{f} + \frac{i G}{f} - \frac{j B}{f}$$

Siendo $\frac{h}{f} = r$, $\frac{i}{f} = g$, $\frac{j}{f} = b$;

Esta última expresión $X = r R + g G + b B$ se denomina **Ecuación unitaria del color** y sus coeficientes son llamados coordenadas tricromáticas del color X. En la figura 3.9 se muestra el diagrama de cromaticidad, representando el color mediante coordenadas como se apuntaba al comienzo del apartado:

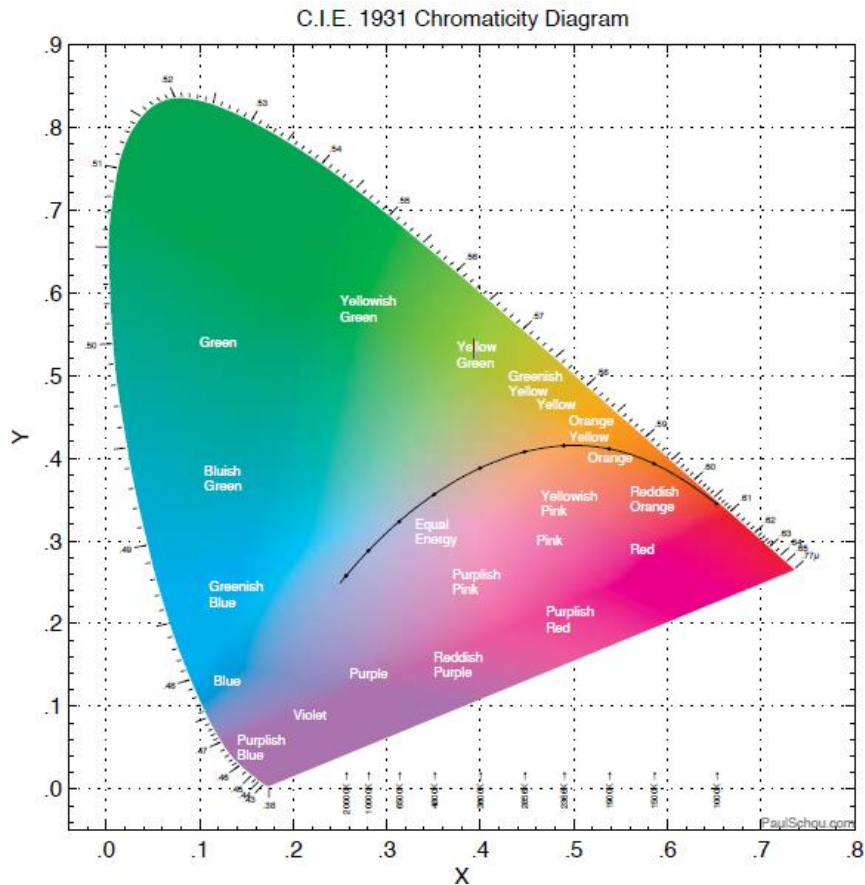


Figura 3.9 Diagrama de cromaticidad y Locus Planckiano (escala de temperaturas). (Wikipedia).

El diagrama de cromaticidad ilustra algunas propiedades interesantes del espacio de color CIE (Comision Internationale de l'Eclairage) XYZ:

- La carta representa todas las cromaticidades visibles para una persona promedio. Éstas se muestran en color, y esta región se conoce como la gama de la visión humana. La gama de todas las cromaticidades visibles en la carta CIE es la figura en forma de herradura de caballo (o en forma de lengua) que se muestra coloreada. El *nicho espectral* corresponde a luz monocromática (con cada punto representando una tonalidad pura de una sola longitud de onda), con las longitudes de onda mostradas en nanómetros. El borde recto en la parte baja de la gama es conocida como la *línea del púrpura*. Estos colores, a pesar de que se encuentran al borde de la gama, no existen realmente en la luz monocromática. Los colores menos saturados aparecen en el interior del esquema, con el blanco hacia el centro.
- Todas las cromaticidades visibles corresponden a valores no negativos de x , y , y z (y por lo tanto a valores no negativos de X , Y , y Z).
- Si se escoge cualquier par de puntos de color en la carta cromática, todos los colores que aparezcan en línea recta entre los dos puntos pueden ser formados a través de la mezcla de estos dos colores. Esto conlleva a deducir que la gama de los colores debe ser de forma convexa. Todos los colores que pueden ser formados mezclando tres primarios pueden ser encontrados dentro del triángulo formado por los puntos iniciales en la carta de cromaticidad (y de la misma manera, para múltiples fuentes).

- A través de tres fuentes de color (primario) reales, es imposible cubrir en su totalidad la gama de la visión humana. Visto geoméricamente, no existen tres puntos dentro de los cuales la gama formada por un triángulo incluya toda la gama posible; o visto de una forma más sencilla, la gama de la visión humana no es triangular.

UTILIZACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE CROMATICIDAD

Los diagramas de cromaticidad tienen varios usos. Todos ellos comparten la propiedad de que una mezcla de aditivos de dos colores se encuentra a lo largo de la línea que los conecta. Esto se puede utilizar para calcular datos colorimétricos tales como la longitud de onda dominante y pureza de excitación de un color.

La longitud de onda dominante se determina trazando una línea desde el punto blanco, a través del color en cuestión, hasta la gráfica espectral. Esto se muestra en la figura 3.10. Independientemente de la composición espectral del color original, una sensación de color equivalente se obtiene mediante la mezcla de luz monocromática de longitud de onda dominante con la blanca especificada. La pureza de excitación da las proporciones de esta mezcla. En este ejemplo, la pureza de excitación es de 40%.

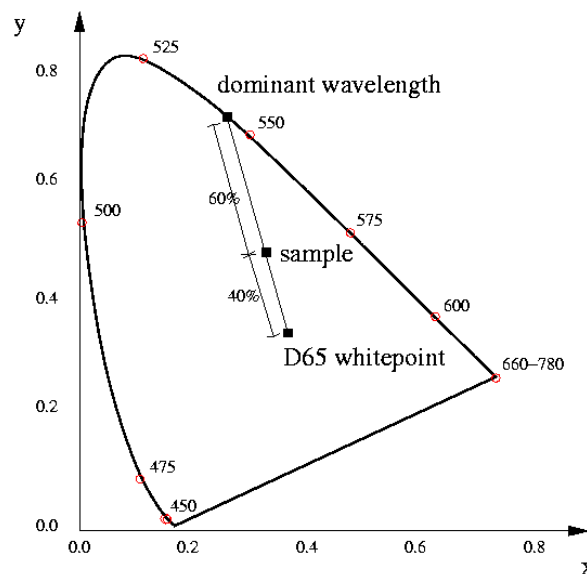


Figura 3.10 Cálculo de la longitud de onda dominante.

En otras palabras, el color de la muestra se hace de la mezcla aditiva de 40% de luz espectral de longitud de onda de 540 nm, y 60% de D65 blanca en la misma luminancia.

Los diagramas de cromaticidad pueden utilizarse para elegir colores complementarios mediante la selección de puntos opuestos el uno al otro a través del punto blanco, y el diseño de escalas de color continuo mediante el trazado de trayectorias rectas o curvas en el diagrama. En general, sin embargo, se utiliza un modelo de color de tres dimensiones para esta tarea, de manera que el brillo de los colores también puede ser alterado.

3.4 REPRODUCCIÓN CROMÁTICA

a) Síntesis aditiva del color

Se suelen considerar como colores primarios de la síntesis aditiva los colores rojo, verde y azul, puesto que con estos tres colores se pueden conseguir todos los demás colores incluido el blanco. Con la mezcla de dos primarios se obtiene un secundario (figura 3.11).

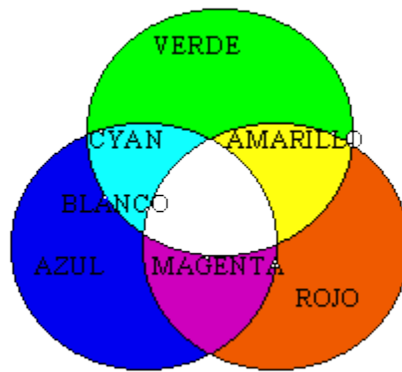


Figura 3.11 Síntesis aditiva del color

Solamente se produce el blanco cuando la proporción de los componentes es adecuada, en caso contrario se produce un color terciario más o menos saturado.

b) Síntesis sustractiva del color

Partiendo de la luz blanca se puede obtener la sensación de todos los colores si a esta mezcla de todas las radiaciones le sustraemos parte de ellas. Esto lo podemos conseguir de diversas formas pero todas ellas filtran la luz blanca dejando pasar solo determinadas radiaciones y obteniéndose por tanto un determinado color (figura 3.12).

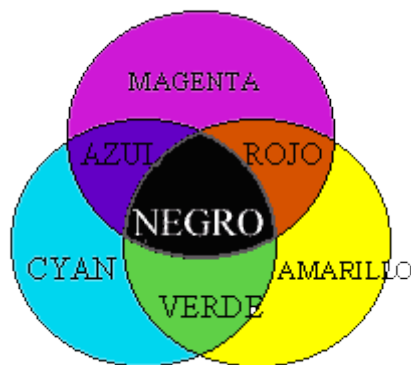


Figura 3.12 Síntesis sustractiva del color

A cada radiación del espectro visible le corresponde un determinado color. Estas luces son monocromáticas pero rara vez en la vida real nos encontraremos con luces

monocromáticas sino más bien con una mezcla de luces. Por tanto, será necesario conocer la composición de la luz con la que trabajamos.

Un papel blanco iluminado por la luz de una vela, aunque en principio parezca igual al ojo humano, será más naranja que si la luz que lo ilumina procede del sol. Es necesario pues para hacer este estudio un elemento objetivo que sirva de referencia para saber lo naranja o lo azul que es un blanco, es decir, para comparar las radiaciones luminosas con lo que se llamará un manantial patrón, que servirá de referencia.

Este manantial patrón recibe el nombre de cuerpo negro y la radiación que emite está en función de su temperatura. A medida que calentamos el cuerpo negro, este radia energía que se hace visible primero en las radiaciones de longitud de onda más larga, 780 nm, correspondiente a los colores rojos, hasta llegar a los azules-violetas, 380 nm. Así podemos relacionar la luz emitida con la temperatura en ese momento, como puede verse en la figura 3.13. La temperatura de color se mide en grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$).

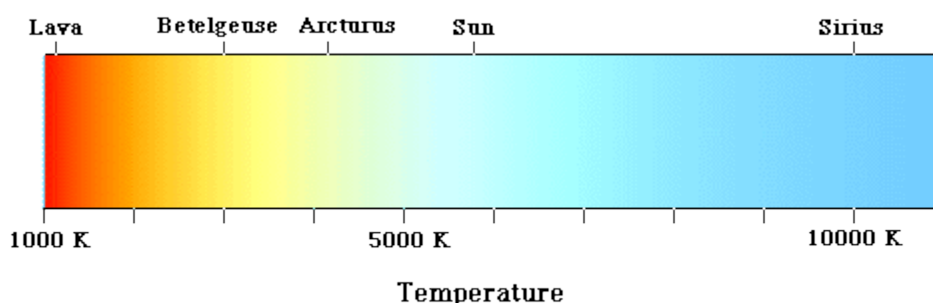


Figura 3.13 Temperaturas del color según el calentamiento del cuerpo negro.

Según esto vemos que es posible obtener un blanco anaranjado, azulado, etc. Se hace necesario definir un blanco o blancos de referencia. Esto lo ha hecho la CIE definiendo la temperatura de color de varios iluminantes.

FUENTES PATRÓN DEFINIDAS POR LA CIE:

Iluminante A: Corresponde a la luz emitida por una lámpara con filamento de wolframio. Equivale a la luz emitida por el cuerpo negro a una temperatura de 2.855 $^{\circ}\text{K}$.

Iluminante B: Corresponde a la luz del mediodía. Su temperatura de color es 4.874 $^{\circ}\text{K}$.

Iluminante C: Corresponde a la luz del día en el hemisferio norte sin sol directo. Su temperatura de color es de 6.774 $^{\circ}\text{K}$.

Iluminante D: Corresponde a la mezcla de luz solar y cielo nublado. Su temperatura de color es de 6.500 $^{\circ}\text{K}$. Es el adoptado actualmente como blanco de referencia para la televisión en color.

Iluminante E: Es el blanco equienergético y representa el blanco que se obtiene al estar presentes todas las longitudes de onda del espectro visible con igual energía. Su temperatura de color es de 5.500 $^{\circ}\text{K}$.

Se puede decir que el color no es algo objetivo en el sentido de que el ser humano solo percibe los colores porque tiene unos fotoconvertidores retinianos que dan lugar a esta percepción (hay animales que solo ven en blanco y negro). Estos fotoconvertidores permiten percibir todos los colores y no uno para cada color. Una mezcla adecuada de dos radiaciones produce una sensación similar a una sola monocromática del mismo color.

Es decir, el ojo humano no es capaz de distinguir si el color amarillo es producido por una radiación de 575 nm o por cualquiera de los procedimientos posibles de síntesis de color, ya que la retina no posee un fotoconvertidor para cada longitud de onda. Podemos conseguir un amarillo mediante la adición de una luz verde y una roja o sustrayendo de la luz blanca todas las radiaciones no amarillas. Las fuentes de luz de la misma cromaticidad pero de diferente espectro se llaman metaméricas. Debe hacerse hincapié en que describir cuantitativamente la calidad de la luz es incluso más complicado por la adaptación cromática del ojo humano. El mecanismo de este fenómeno no está completamente entendido.

Para estimar la calidad de la luz, las coordenadas cromáticas de las muestras de ensayo se miden bajo iluminación por la fuente a ser probado y por una fuente de referencia. Entonces, se evaluarán los cambios colorimétricos y calificarán con respecto a la adaptación cromática. Esta adaptación se realiza mejorando el diagrama CIE XYZ, introduciendo el diagrama con escala de cromaticidad uniforme UCS (Uniform Chromatic Scale) a partir de las coordenadas XYZ:

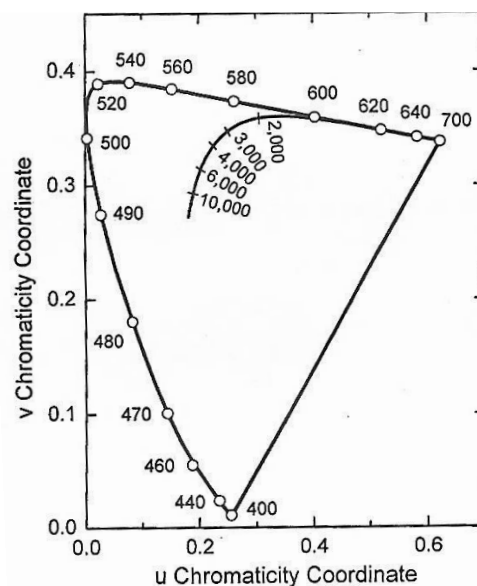


Figura 3.14 Diagrama CIEuv 1960 con escala de cromaticidades uniforme

Usando coordenadas cromáticas UCS, la calidad de la luz puede ser evaluada en términos del índice de reproducción cromática (CRI) R_a , que evalúa los cambios colorimétricos obtenidos por comparación con patrones escogidos específicamente en varias pruebas de ensayo. Para obtener información adicional sobre la calidad de la luz se recurre al índice especial de reproducción cromática, R_i , que indica la comparativa con cada patrón específico.

MODELOS DE COLOR MÁS IMPORTANTES

- CIE 1931 XYZ

Este espacio de color ya se ha discutido, es el espacio de color primario para la medición colorimétrica y la base para otros espacios de color CIE. Tiene la ventaja de ser rigurosamente definido, y una norma internacional. Aunque es bueno para presentar una descripción de un color existente medido, no es particularmente fácil de usar para especificar nuevos colores. Esto es porque las primarias no son colores visibles. Mientras que los colores primarios son siempre positivos, los ejes se encuentran fuera de la gama de color visible.

- 1976 CIELUV

Si la luminancia de un color se divide por la de algún blanco de referencia, se obtiene una escala de luminancia relativa de 0 a 100% (negro y blanco). La medida de la luminancia, sin embargo, no se corresponde bien a la luminosidad percibida; la escala es marcadamente no uniforme, con todos los colores oscuros agrupados en un extremo. CIE ha recomendado una fórmula no lineal para la ligereza, L^* , que corresponde más estrechamente a la sensación percibida. El medio, 50% de gris, ocurre a $L^* = 50$.

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad \text{for } \frac{Y}{Y_n} > 0.008856$$

$$L^* = 903.292 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \quad \text{for } \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856$$

$$u^* = 13L^* [u' - u_n]$$

$$v^* = 13L^* [v' - v_n]$$

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

Y_n es el valor triestímulo Y para el blanco de referencia, en otras palabras, el blanco al que se adapta el ojo, u_n' y v_n' son las coordenadas UCS de la referencia de blanco elegido. Las fórmulas tercera y cuarta trasladan el origen del diagrama UCS al punto blanco, y escalan las coordenadas relativas de cromaticidad en función de su luminosidad, de modo que la distancia geométrica entre dos colores se reduce a medida que se hacen más oscuros. Esto tiene en cuenta el hecho de que los colores oscuros se

asemejan más que los claros, incluso cuando las cromaticidades son las mismas. El espacio de color que resulta por lo tanto forma parecida a un cono sólido. El negro, en $L^* = 0$ es por lo tanto un solo color en el vértice de este cono.

Para la mayoría de los propósitos, se utiliza un iluminante estándar como la referencia blanca. El CIE ha recomendado un espacio de color uniforme de 3 dimensiones llamada espacio de color CIE 1976 ($L^* u^* v^*$). Se conoce comúnmente como CIELUV, y puede ser considerado una versión uniforme del espacio CIE 1931 XYZ.

- RGB (red, green, blue)

El modelo o la descripción RGB (del inglés Red, Green, Blue; "rojo, verde, azul") de un color hace referencia a la composición del color en términos de la intensidad de los colores primarios de la luz: rojo, verde y azul. Es un modelo de color basado en la síntesis aditiva, con el que es posible representar un color mediante la mezcla por adición de los tres colores de luz primarios. El modelo de color RGB no define por sí mismo lo que significa exactamente rojo, verde o azul, por lo que los mismos valores RGB pueden mostrar colores notablemente diferentes en diferentes dispositivos que usen este modelo de color. Aunque utilicen un mismo modelo de color, sus espacios de color pueden variar considerablemente.

Para indicar con qué proporción es mezclado cada color, se asigna un valor a cada uno de los colores primarios, de manera que el valor "0" significa que no interviene en la mezcla y, a medida que ese valor aumenta, se entiende que aporta más intensidad a la mezcla. Aunque el intervalo de valores podría ser cualquiera (valores reales entre 0 y 1, valores enteros entre 0 y 37, etc.), es frecuente que cada color primario se codifique con un byte (8bits). Así, de manera usual, la intensidad de cada una de las componentes se mide según una escala que va del 0 al 255 y cada color es definido por un conjunto de valores escritos entre paréntesis (correspondientes a valores "R", "G" y "B") y separados por comas.

De este modo, el rojo se obtiene con (255,0,0), el verde con (0,255,0) y el azul con (0,0,255), obteniendo, en cada caso un color resultante monocromático. La ausencia de color, es decir el color negro, se obtiene cuando las tres componentes son 0: (0,0,0). La combinación de dos colores a su máximo valor de 255 con un tercero con valor 0 da lugar a tres colores intermedios. De esta forma, aparecen los colores amarillo (255,255,0), cian (0,255,255) y magenta (255,0,255). El color blanco se forma con los tres colores primarios a su máximo valor (255,255,255).

El conjunto de todos los colores también se puede representar en forma de cubo, como se muestra en la figura 2.15. Cada color es un punto de la superficie o del interior de éste. La escala de grises estaría situada en la diagonal que une al color blanco con el negro.

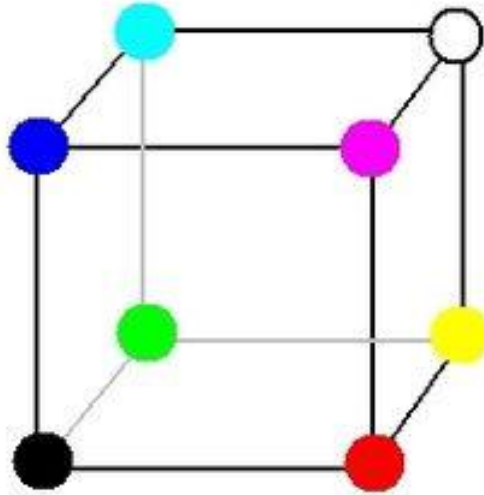
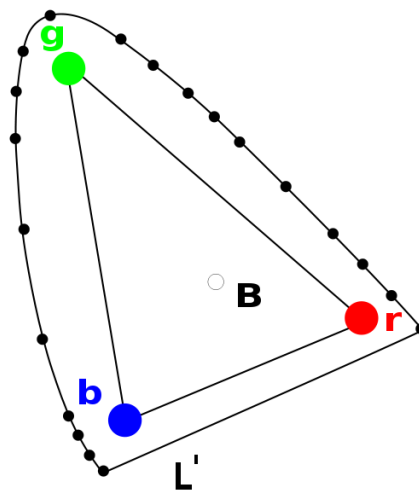


Figura 3.15 Cubo RGB. (Wikipedia)

Si se dispone de tres fuentes luminosas, r , g y b , de las características indicadas en la figura 3.16:



Cualquier color que se pueda obtener a partir de esos tres colores primarios tendrá la forma:

$$(ir, ig, ib)$$

donde ir , ig y ib son los coeficientes de las intensidades correspondientes a cada color primario. Si se sitúan los colores obtenidos en el gráfico, se tiene que:

- Si dos de los coeficientes son nulos, el color se sitúa en el vértice correspondiente al color de coeficiente no nulo.
- Si un coeficiente es nulo, el color se sitúa en uno de los lados del triángulo: el conjunto de todos ellos son los colores más saturados.

- Si ninguno de los coeficientes es nulo, el color se sitúa en un punto del interior; cuanto más parecidos sean los tres coeficientes, más cerca estará del blanco (en el centro).

Al representar combinaciones de tres valores independientes en un diagrama que sólo tiene dos, resulta que a cada punto del diagrama le corresponde toda una familia de colores. Por ejemplo, los siguientes colores tienen la misma proporción de rojo, verde y azul, y por tanto les corresponde el mismo punto del gráfico. Sólo se diferencian en la intensidad, como se muestra en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Variación de las intensidades		
100, 50, 0	#643200	Marrón oscuro
200, 100, 0	#c86400	Marrón claro
150, 75, 0	#964b00	Marrón

Si las intensidades i_r , i_g y i_b tienen un límite superior (255), la condición necesaria y suficiente para que un color sea el más intenso de la familia (es decir, de los representados por el mismo punto) es que al menos uno de sus coeficientes sea 255.

Los colores que presentan la máxima saturación y la máxima luminosidad a la vez, son los que reúnen dos requisitos: al menos uno de los coeficientes es 255 y al menos uno de los coeficientes es 0. De esto se deduce que los colores más saturados y más luminosos siguen la siguiente secuencia:

- (0, 0, 0) es negro
- (255, 255, 255) es blanco
- (255, 0, 0) es rojo
- (0, 255, 0) es verde
- (0, 0, 255) es azul
- (255, 255, 0) es amarillo
- (0, 255, 255) es cian
- (255, 0, 255) es magenta

Podemos ver la distribución de estos colores en la figura 3.17:

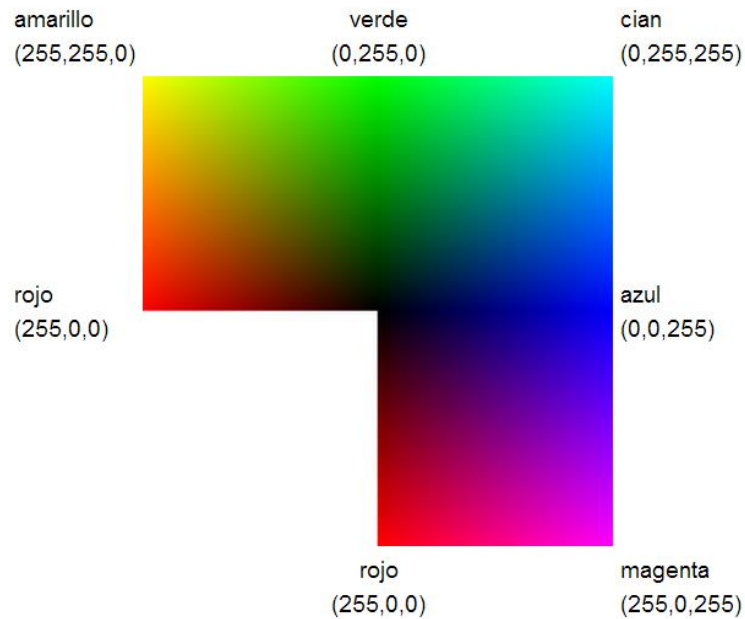


Figura 3.17 Coordenadas RGB y colores

- HSV (Hue Saturation Value)

El modelo **HSV** (del inglés *Hue*, *Saturation*, *Value*), también llamado **HSB** (*Hue*, *Saturation*, *Brightness*), define un modelo de color en términos de sus componentes: matiz H, saturación S y valor V, como se ve en la figura 3.18:

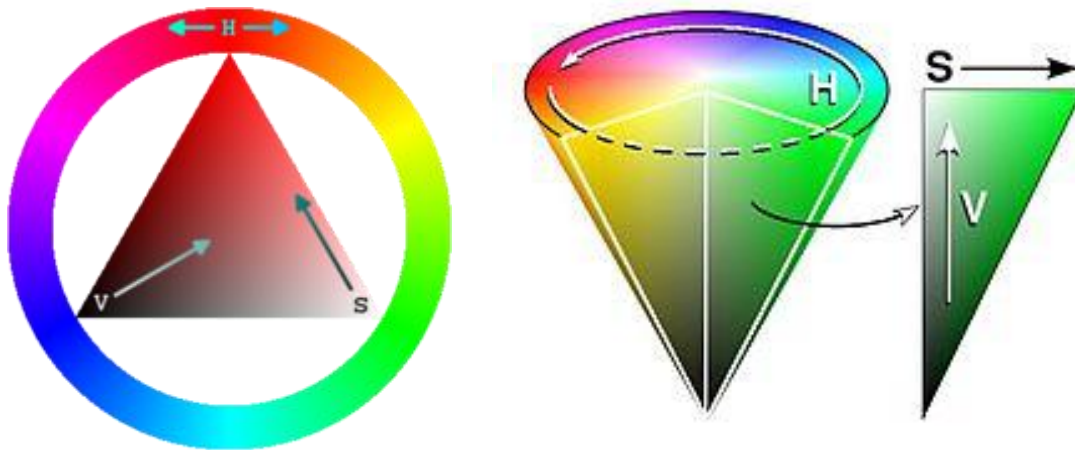


Figura 3.18 Espacio de color HSV

Es común que deseemos elegir un color adecuado para alguna de nuestras aplicaciones, cuando es así resulta muy útil usar la ruleta de color HSV. En ella el matiz se representa por una región circular; una región triangular separada, puede ser usada para representar la saturación y el valor del color. Normalmente, el eje horizontal del triángulo denota la saturación, mientras que el eje vertical corresponde al valor del color. De este modo, un color puede ser elegido al tomar primero el matiz de una región circular, y después seleccionar la saturación y el valor del color deseados de la región triangular. Sus características constituyentes en coordenadas cilíndricas son:

Matiz

Se representa como un grado de ángulo cuyos valores posibles van de 0 a 360° (aunque para algunas aplicaciones se normalizan del 0 al 100%). Cada valor corresponde a un color. Ejemplos: 0 es rojo, 60 es amarillo y 120 es verde.

De forma intuitiva se puede realizar la siguiente transformación para conocer los valores básicos RGB:

Disponemos de 360 grados dónde se dividen los 3 colores RGB, eso da un total de 120° por color, sabiendo esto podemos recordar que el 0 es rojo RGB(1, 0, 0), 120 es verde RGB(0, 1, 0) y 240 es azul RGB(0, 0, 1). Para colores mixtos se utilizan los grados intermedios, el amarillo, RGB (1, 1, 0) está entre rojo y verde, por lo tanto 60°. Se puede observar cómo se sigue la secuencia de sumar 60 grados y añadir un 1 o quitar el anterior:

0° = RGB(1, 0, 0)

60° = RGB(1, 1, 0)

120° = RGB(0, 1, 0)

180° = RGB(0, 1, 1)

240° = RGB(0, 0, 1)

300° = RGB(1, 0, 1)

360° = 0°

Esta transformación permite saber los tonos de matices de colores puros que contienen alguna cantidad (o ninguna) de los colores R, G y B. Para el color blanco se puede poner cualquier color y saturación, siempre que se establezca el valor (de luminosidad) máximo. Asimismo, para el color negro se puede poner cualquier color y saturación, siempre que se ponga un valor de 0.

Saturación

Se representa como la distancia al eje de brillo negro-blanco. Los valores posibles van del 0 al 100% (tabla 2.2). A este parámetro también se le suele llamar "pureza" por la analogía con la pureza de excitación y la pureza colorimétrica de la colorimetría. Cuanto menor sea la saturación de un color, mayor tonalidad grisácea habrá y más decolorado estará. Por eso es útil definir la insaturación como la cualidad inversa de la saturación.

Tabla 2.2 Graduaciones de saturación en el modelo HSV

Graduaciones de saturación en el modelo HSV				
matiz 100% puro	75% de saturación	saturación media	25% de saturación	0 de saturación

Para calcular la saturación, simplemente divide el croma por el máximo croma para ese valor.

$$S_{HSV} = \begin{cases} 0, & \text{if } C = 0 \\ \frac{C}{V}, & \text{otherwise} \end{cases}$$

Valor

Representa la altura en el eje blanco-negro. Los valores posibles van del 0 al 100%. 0 siempre es negro. Dependiendo de la saturación, 100 podría ser blanco o un color más o menos saturado.

- HLS

Similar a HSV, este modelo de color tiene un eje de luminosidad en lugar de un eje de valores. Los colores puros tienen una saturación de 0,5, en lugar de 1,0 en HSV. HLS puede considerarse una simple deformación de HSV producida moviendo el punto blanco de tal forma que el color puro quede en el punto medio situado entre el punto negro (el nivel 0) y el punto blanco (nivel 1). Al igual que el HSV, es un espacio de color cilíndrico pero se dibuja a menudo como un cono - en este caso, un extremo doble uno. HLS, como el HSV, simplemente es otra representación del espacio RGB.

CAPITULO 4 - TIPOS DE LUMINARIAS Y ECONOMÍA DE LA LUZ

En este capítulo se estudiarán las fuentes de luz existentes que compiten y competirán con la iluminación a partir de semiconductores. Finalmente, se abordará brevemente la economía de la iluminación.

4.1 BOMBILLAS Y TUBOS

La tecnología de iluminación sin semiconductores es muy versátil y, en muchos casos, define las perspectivas de avances para la iluminación en estado sólido. Se presentarán los principios físicos básicos de operación y dispositivos diseñados, repasando la eficiencia y calidad de la luz. También se discutirán las ventajas y desventajas, y las aplicaciones de estos sistemas.

4.1.1 LÁMPARAS DE FILAMENTO INCANDESCENTE

La emisión de las lámparas incandescentes es debida a la radiación de cuerpo negro. En las actuales, el filamento está hecho casi siempre de tungsteno, ya que tiene el punto de fusión más alto (3683 K) y la mínima tasa de evaporación (mínima presión de vapor). Sin embargo, el elevado punto de fusión no es suficiente para llevar la longitud de onda pico al espectro visible, e incluso a altas temperaturas, la mayor parte de la emisión es infrarroja, como se aprecia en la figura 4.1:

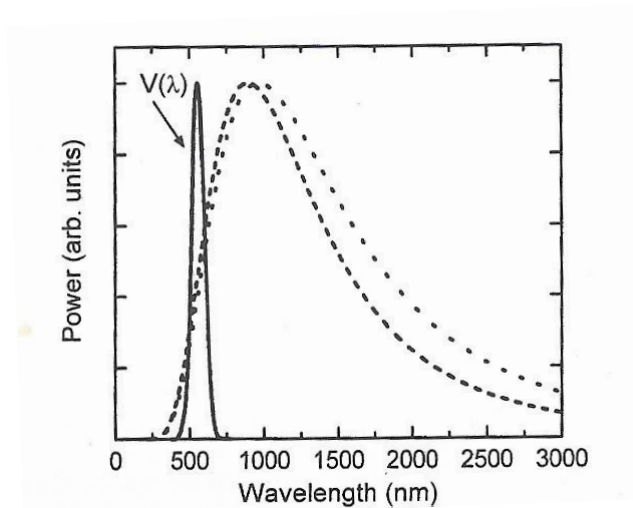
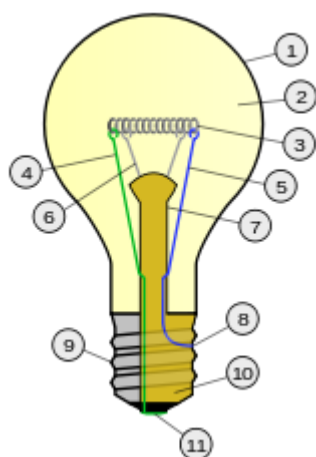


Figura 4.1 Distribución de energía espectral normalizada del cuerpo negro (línea de puntos) y del radiador de tungsteno (línea discontinua) a 3000 K. La línea continua es la sensibilidad espectral del ojo humano.

PARTES

Como se ha indicado, la bombilla clásica consta de un filamento de tungsteno o de wolframio muy fino, encerrado en una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío, o se ha rellenado con un gas inerte, para evitar que el filamento se volatilice por las altas temperaturas que alcanza. Se completa con un casquillo metálico, en el que se ubican las conexiones eléctricas, como puede verse en la figura 4.2:



- 8. Base de contacto.
- 9. Casquillo metálico.
- 10. Aislamiento eléctrico.
- 11. Pie de contacto eléctrico.

- 1. Envoltura - ampolla de vidrio - bulbo.
- 2. Gas inerte.
- 3. Filamento de wolframio.
- 4. Hilo de contacto (va al pie).
- 5. Hilo de contacto (va a la base).
- 6. Alambre(s) de sujeción y disipación de calor del filamento.
- 7. Conducto de refrigeración y soporte interno del filamento.

Figura 4.2 Composición de una bombilla de filamento incandescente

La ampolla varía de tamaño con la potencia de la lámpara, puesto que la temperatura del filamento es muy alta y, al crecer la potencia y el desprendimiento de calor, es necesario aumentar la superficie de enfriamiento. Inicialmente en el interior de la ampolla se hacía el vacío. Actualmente la ampolla está rellena de algún gas noble (normalmente argón y raramente kriptón) que impide la combustión del filamento, ya que la principal causa de fallo de la bombilla de filamento incandescente es la pérdida de tungsteno por evaporación. También se introduce una pequeña cantidad de nitrógeno para prevenir la formación de un arco en caso de ruptura del filamento. El casquillo sirve también para fijar la lámpara en un portalámparas por medio de una rosca (llamada Rosca Edison) o una bayoneta.

PROPIEDADES

La lámpara incandescente es la de más bajo rendimiento luminoso de las lámparas utilizadas: de 12 a 18 lm/W (lúmenes por vatio de potencia) y la que menor vida útil o durabilidad tiene: unas 1000 horas, pero es la más difundida, por su bajo precio y el color cálido de su luz.

No ofrece muy buena reproducción de los colores, ya que no emite en la zona del espectro de colores fríos, pero al tener un espectro de emisiones continuo logra contener todas las longitudes de onda en la parte que emite del espectro. Como se ha apuntado al inicio, su eficiencia es muy baja, ya que sólo convierte en luz visible alrededor del 15% de la energía consumida. Otro 25% se transforma en energía calorífica y el 60% restante en radiación no perceptible, luz ultravioleta y luz infrarroja, que acaban convirtiéndose en calor.

4.1.2 LÁMPARAS HALÓGENAS DE TUNGSTENO

La **lámpara halógena** es una variante de la lámpara incandescente con un filamento de tungsteno dentro de un gas inerte y una pequeña cantidad de halógeno (como yodo o bromo). Esta cantidad de halógeno es añadida para establecer un ciclo químico de transporte de los haluros de tungsteno cuando se difunden desde el filamento caliente en dirección a la pared más fría. Los haluros de tungsteno se difunden en la dirección opuesta y se disocian en el filamento. El ciclo de transporte provoca una concentración casi cero de tungsteno en las paredes de la bombilla. El resultado es que el filamento puede alcanzar temperaturas tan altas como los 3450 K, con su consecuente mejora de eficiencia.

El filamento y los gases se encuentran en equilibrio químico, mejorando el rendimiento del filamento y aumentando su vida útil. El vidrio se sustituye por un compuesto de cuarzo, que soporta mucho mejor el calor (figura 4.3).

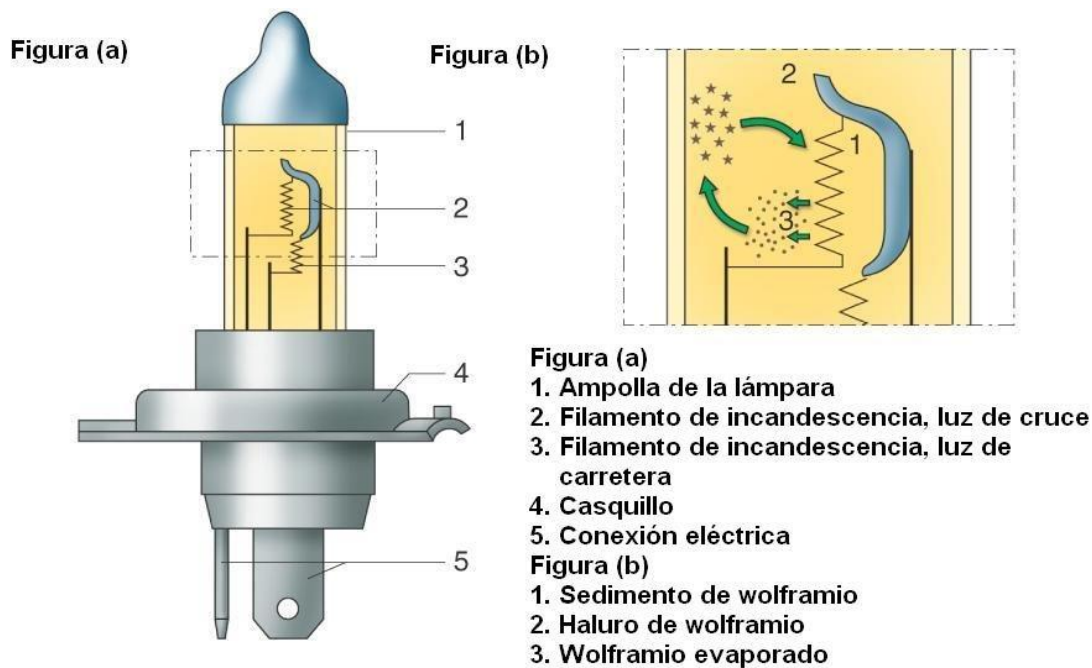


Figura 4.3 (a) Bombilla halógena. **(b)** Ciclo de transporte

El mecanismo de fallo más habitual de estas lámparas es similar al de filamento incandescente. Sin embargo, tienen al menos el doble de tiempo de vida con la misma eficiencia, o más eficiencia en el mismo tiempo de vida. Algunas de estas lámparas funcionan a baja tensión (por ejemplo 12 voltios) con temperaturas de color elevadas. Esto les hace atractivas para muchas aplicaciones. Una de sus desventajas es su largo tiempo de enfriamiento.

4.1.3 LÁMPARAS DE DESCARGA A BAJA PRESIÓN

4.1.3.1 LÁMPARAS FLUORESCENTES

Las lámparas fluorescentes son lámparas de vapor de mercurio a **baja presión** (0.8 Pa). Son de luz dura. En estas condiciones, en el espectro de emisión del mercurio predominan las radiaciones ultravioletas en la banda de 253.7 nm. Para que estas radiaciones sean útiles, se recubren las paredes interiores del tubo con polvos fluorescentes que convierten los rayos ultravioletas en radiaciones visibles. De la composición de estas sustancias dependerán la cantidad y calidad de la luz, y las cualidades cromáticas de la lámpara. En la actualidad se usan dos tipos de polvos; los que producen un espectro continuo y los trifósforos que emiten un espectro de tres bandas con los colores primarios. De la combinación estos tres colores se obtiene una luz blanca que ofrece un buen rendimiento de color sin penalizar la eficiencia como ocurre en el caso del espectro continuo.

El cebador, partidor o arrancador está formado por una pequeña ampolla de cristal que contiene gases a baja presión (neón, argón y gas de mercurio) y en cuyo interior se halla un contacto formado por una lámina bimetálica doblada en "U". Tanto el cebador como la luminaria acortan su vida útil cuantas más veces se la enciende, y por esta razón se recomienda usar la iluminación fluorescente en regímenes continuos y no como iluminación intermitente.

Al aplicar la tensión de alimentación, los gases contenidos en la ampolla del cebador se ionizan, con lo que aumenta su temperatura lo suficiente para que la lámina bimetálica se deforme, haga contacto cerrando el circuito, lo que hará que los filamentos de los extremos del tubo se calienten al rojo vivo, y esto comienza la ionización de los gases en la vecindad de los filamentos. Al cerrarse el contacto el cebador se apaga y sus gases vuelven a enfriarse, por lo que un par de segundos después el contacto se abre nuevamente. Esta apertura trae como consecuencia que el campo magnético creado en la reactancia inductiva desaparezca bruscamente, lo que trae como consecuencia, de acuerdo con la ley de inducción de Faraday,⁵ la generación de un pico de alta tensión (autoinducción) que termina de ionizar los gases. Se forma plasma conductor dentro de todo el tubo fluorescente y, por lo tanto, lo atraviesa una corriente de electrones que interactúa con los átomos de Hg, Ar y Ne, excitándolos, los que emitirán luz al desexcitarse, principalmente en la región del ultravioleta (UV) (figura 4.4):

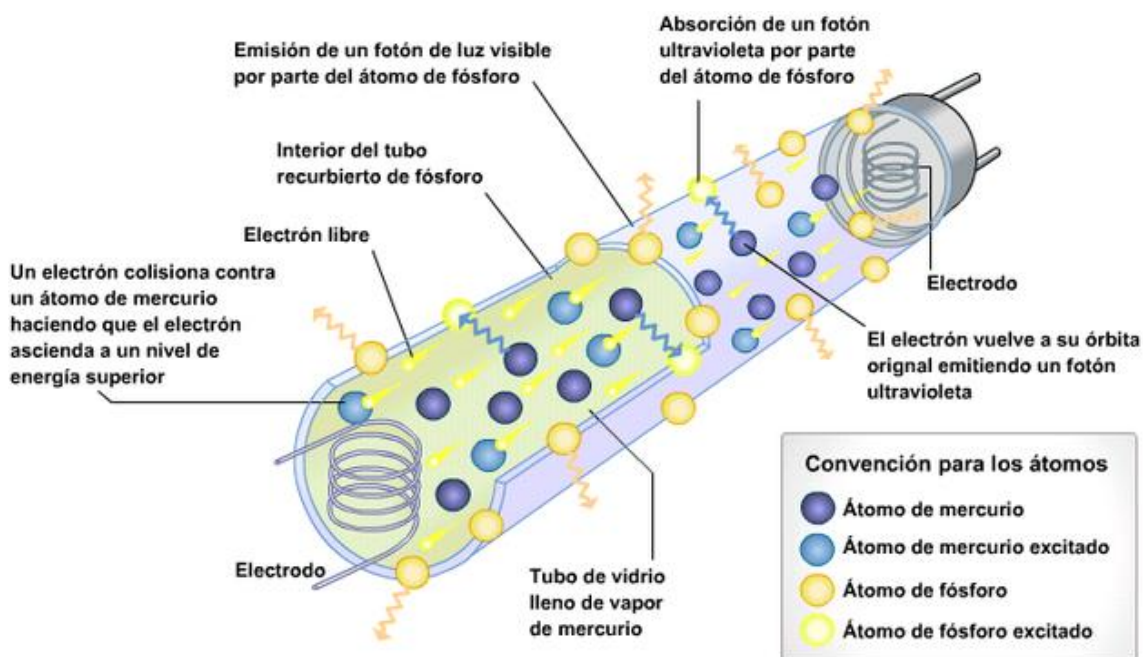


Figura 4.4 Esquema de una lámpara fluorescente

El voltaje aplicado a los filamentos y al tubo es pulsante, porque la tensión eléctrica que alimenta el circuito es corriente alterna de 50 Hz (en Europa,...) o de 60 Hz (en USA,

Japón,...). Los filamentos poseen inercia térmica, pero el plasma no, lo que produce un veloz parpadeo en la luz emitida, que puede molestar a algunas personas, producir dolor de cabeza y hasta convulsiones a quienes sufren de epilepsia. Este fenómeno se minimiza al disponer los tubos en grupos, alimentados cada tubo desde fases distintas y con rejillas de dispersión estroboscópica.

Los filamentos, al calentarse, desprenden electrones que, junto con el pico de autoinducción, ionizan los gases que llenan el tubo; se forma así un plasma que conduce la electricidad. Este plasma excita los átomos del vapor de mercurio que, al desexcitarse, emiten luz visible y ultravioleta. El revestimiento interior de la lámpara tiene la función de filtrar y convertir la luz ultravioleta en visible. La coloración de la luz emitida por la lámpara depende del material de ese recubrimiento interno. El material del tubo, vidrio común, contribuye a reducir la luz UV que pudiera escapar fuera de la luminaria.

PROPIEDADES

-**LUMINOSIDAD**: lámparas fluorescentes tienen un rendimiento luminoso que puede estimarse entre 50 y 90 lúmenes por vatio (lm/W). Una cuestión curiosa es que la luminosidad de la lámpara depende no solamente del revestimiento luminescente, sino de la superficie emisora, de modo que al variar la potencia varía el tamaño, por ejemplo, la de 18 W mide unos 60 cm, la de 36 W, 1,20 m y la de 58 W 1,50 m.

-**VIDA ÚTIL**: su vida útil es también mucho mayor que la de las lámparas de incandescencia, pudiendo variar con facilidad entre 5000 h y más de 20000 h (entre 5 y 15 veces más), lo que depende de diversos factores, tales como el tipo de lámpara fluorescente o el equipo complementario que se utilice con ella.

-**COLOR**: hay en el mercado distintos modelos con diferentes temperaturas de color. Su temperatura de color está comprendida generalmente entre los 3000 K y los 6500 K (del Blanco Cálido a Luz Día Frío). Sin embargo, en la actualidad se pueden conseguir tubos con una amplia gama de temperatura de color, lo que permite encontrar con relativa facilidad modelos que van desde los 2700 K hasta los 10000 K, siendo el mas recomendado el color blanco (4000K).

-**RENDIMIENTO**: en condiciones óptimas, la energía consumida es convertida en radiación UV con un 63% de eficiencia (lo perdido es disipado en forma de calor en la descarga, electrodos y paredes). Solo un 40% de la radiación UV es convertida en visible. Por tanto, la eficiencia global de conversión es de un 28% aproximadamente. La eficiencia luminosa va de 35 a 50 lm/W en unidades de baja potencia (4~5W) a 75 y 100 lm/W en lámparas de alta potencia (10~60W). Sin embargo, la elevada eficiencia

luminosa es conseguida en muchos tipos de lámparas a costa de una menor reproducción cromática.

Una de las principales desventajas de las lámparas fluorescentes es que no dan una luz continua, sino que muestran un parpadeo que depende de la frecuencia de la corriente alterna aplicada (por ejemplo: en España, 50 Hz). Esto no se nota mucho a simple vista, pero una exposición continua a esta luz puede dar dolor de cabeza. El efecto es el mismo que si se configura una pantalla de ordenador a 50 Hz.

El parpadeo, aunque poco perceptible, puede afectar notablemente la salud de algunas personas con algunos tipos migrañas, epilepsia y, en algunos casos, su efecto es tan devastador para la salud que hay quienes quedan excluidos completamente de algunos ámbitos públicos (bibliotecas, trabajo, deportes,...) en los que suelen utilizarse este tipo de iluminación.

Las lámparas fluorescentes ven reducida su vida útil si son encendidas y apagadas de manera continuada, visto que su acción de encender les cuesta mucho más trabajo que mantenerse encendidas. Por tanto, el fallo de las lámparas fluorescentes se suele determinar por el deterioro de sus cátodos.

Una desventaja es su fuerte dependencia luminosa con la temperatura ambiente, la cual influye en la presión del vapor de mercurio, como puede verse en la figura 4.5:

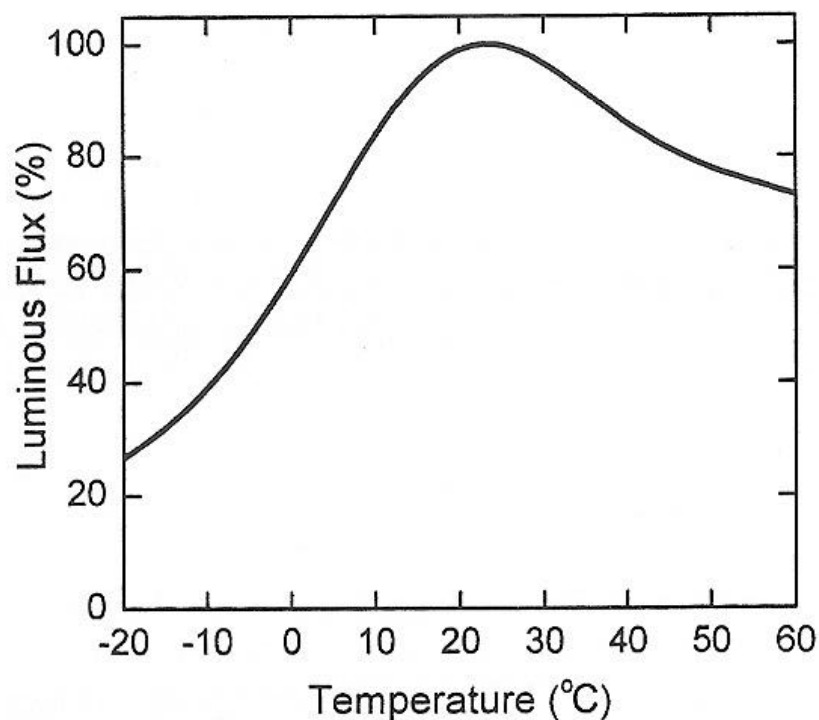


Figura 4.5 Comportamiento luminoso de una lámpara fluorescente respecto de la temperatura ambiente.

Como casi todas las lámparas de descarga, las fluorescentes contienen mercurio. La recolección y el reciclado de las lámparas fluorescentes que dejen de funcionar es un problema serio que requiere infraestructuras nacionales e internacionales.

4.1.3.2 Lámparas de sodio a baja presión (SBP)

La **lámpara de vapor de sodio** es un tipo de lámpara de descarga de gas que usa vapor de sodio para producir luz. Son una de las fuentes de iluminación más eficientes, ya que proporcionan gran cantidad de lúmenes por vatio. El color de la luz que producen es amarilla brillante. La lámpara de vapor de sodio a baja presión es la más eficiente, ya que genera más de 140 lum/W. Por contra la reproducción cromática es muy pobre ya que el sodio emite luz amarilla casi monocromática de longitud de onda 589~589.6 nm. Sin embargo, el punto de fusión del sodio es más alto que el del mercurio con una temperatura de trabajo óptima de 530 K. Además, el sodio es altamente reactivo. En

estas lámparas el tubo de descarga tiene forma de U para disminuir las pérdidas por calor y reducir el tamaño de la lámpara (figura 4.5).

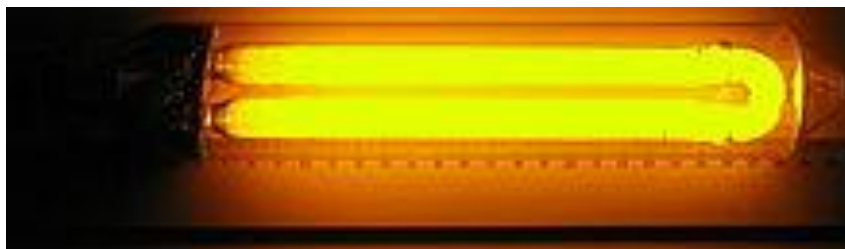


Figura 4.5 Lámpara de vapor de sodio a baja presión

El foco de vapor de sodio está compuesto de un tubo de descarga de cerámica translúcida con el fin de soportar la alta corrosión del sodio y las altas temperaturas que se generan. En los extremos tiene dos electrodos que suministran la tensión eléctrica necesaria para que el vapor de sodio encienda. Para operar estas lámparas se requiere de un balasto y uno o dos condensadores para el arranque.

A temperaturas de trabajo, la presión del sodio se mantiene entre 0,7 y 1 Pa. A diferencia de las lámparas fluorescentes, Los cátodos se calientan a la temperatura de emisión de electrones por bombardeo de iones. El tubo se llena con gas neón a presión de entre 500 y 2000 Pa. Se le añaden pequeñas cantidades de argón, xenón y helio para facilitar el arranque.

Cuando la lámpara es encendida, la descarga empieza en el neón. El vapor de sodio alcanza su valor óptimo a los 10~15 minutos de calentamiento. Por esto para el encendido requiere alrededor de 9-10 minutos y para el reencendido de 4-5 minutos. El tiempo de vida de estas lámparas es muy largo ya que ronda las 24000 horas. Su eficiencia luminosa está entre 135...175 lum/W, la más alta hasta las presentes lámparas de uso, a pesar de que alrededor del 70% de energía es perdida en radiación infrarroja y pérdidas por calentamiento.

Si bien son de elevado rendimiento luminoso, el hecho de tener una luz monocromática hace que sus aplicaciones se vean reducidas. Se usa preferentemente en alumbrado vial: rutas, autopistas, muelles, depósitos, etc., también se utiliza con fines decorativos.

También se utiliza para hacer florar las plantas de marihuana (porque su espectro lumínico es el ideal)

4.1.4 LÁMPARAS DE DESCARGA A ALTA PRESIÓN

Físicamente, las lámparas de descarga a alta presión se diferencian de las de descarga a baja presión en que las partículas pesadas (átomos e iones) son calentadas hasta las

mismas temperaturas que los electrones (4000 a 6000 K) debido a la alta tasa de colisiones elásticas. La alta presión aumenta las colisiones en la zona del espectro visible. El ancho de banda de emisión resultante mejora considerablemente la reproducción cromática de la luz, pero el plasma que se forma a esas temperaturas aumenta las pérdidas por calor, reduciendo la eficiencia a un 60%. Para reducir esas pérdidas, comúnmente se recubre el tubo con otra bombilla. Principalmente, hay de tres tipos:

- Lámparas de mercurio
- Lámparas de descarga de sodio a alta presión (SAP)
- Lámparas de halogenuros metálicos

A continuación se muestran sus distribuciones espectrales de energía en la figura 4.6:

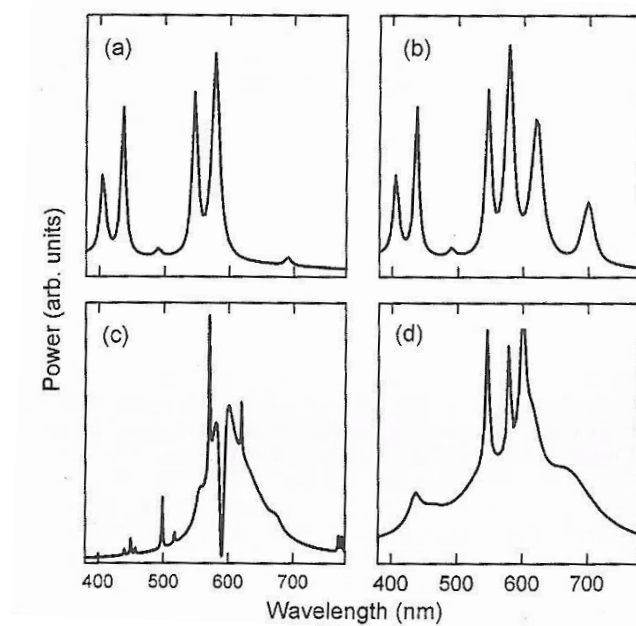


Figura 4.6 Distribuciones espectrales de energía de las lámparas de descarga a alta presión: (a) lámpara de mercurio; (b) lámpara de mercurio con mejora de color; (c) lámpara de sodio; (d) lámpara de haluros metálicos

4.1.4.1 Lámparas de descarga de mercurio a alta presión

Como se ha indicado antes, las lámparas fluorescentes son lámparas de vapor de mercurio a baja presión (0.8 Pa). A medida que aumentamos la presión del vapor de mercurio en el interior del tubo de descarga, la radiación ultravioleta característica de la lámpara a baja presión pierde importancia respecto a las emisiones en la zona visible

(violeta de 404.7 nm, azul 435.8 nm, verde 546.1 nm y amarillo 579 nm). En estas condiciones, (entre 0,2 y 1 MPa de presión) la luz emitida, de color azul verdoso, no contiene radiaciones rojas.

Esta deficiencia en el color rojo hace que la lámpara de mercurio tenga una pobre reproducción cromática ($R_a=16$). La lámpara de mercurio mejora su cromaticidad mediante el recubrimiento de la pared interior del vidrio exterior con fósforo, que convierte el resto de UV en luz roja (figura 3.6b). El fósforo aumenta la reproducción cromática hasta 50. La eficiencia luminosa media durante el tiempo de vida depende de la tensión, y va desde 20 hasta 45 lm/W en las normales, y hasta 50 lm/W en las recubiertas de fósforo.

4.1.4.2 Lámparas de descarga de sodio a alta presión (SAP)

la lámpara de vapor de sodio SBP a alta presión es una de las más utilizadas en el alumbrado público ya que proporciona una reproducción de los colores considerablemente mejor que la anterior, aunque no tanto como para iluminar algo que requiera excelente reproducción cromática. Tienen una distribución espectral que abarca casi todo el espectro visible (figura 4.6c) proporcionando una luz blanca dorada mucho más agradable que la proporcionada por las lámparas de baja presión.

El tiempo de vida de estas lámparas es muy largo ya que ronda las 24000 horas y su rendimiento está entre 80...115 lm/W, valor que sigue siendo un valor alto comparado con el de otros tipos de lámparas.

4.1.4.3 Lámparas de halogenuros metálicos

Si a la lámpara de vapor de mercurio le añadimos yoduros metálicos en el tubo de descarga (sodio, talio, indio...), se consigue mejorar considerablemente la capacidad de reproducir el color de. Cada una de estas sustancias aporta nuevas líneas al espectro (por ejemplo amarillo el sodio, verde el talio y rojo y azul el indio).

Los resultados de estas aportaciones son una temperatura de color de 3000 a 6000 K dependiendo de los yoduros añadidos y un rendimiento del color de entre 65 y 85. La eficiencia de estas lámparas ronda entre los 70 y 110 lm/W y su vida media es de unas 10000 horas. Tienen un periodo de encendido de unos diez minutos, que es el tiempo necesario hasta que se estabiliza la descarga. Para su funcionamiento es necesario un dispositivo especial de encendido, puesto que las tensiones de arranque son muy elevadas (1500-5000 V).

Los halogenuros metálicos deben ser mantenidos en un régimen de disociación parcial y la densidad de vapor de metales añadidos es fuertemente dependiente de la temperatura, lo que hace que pueda cambiar las propiedades de una lámpara a otra. El color de estas lámparas cambia con el paso del tiempo.

Las lámparas de halogenuros metálicos tienen un rango grande de aplicación. Gracias a sus características de gran brillo y cromaticidad elevada, estas luminarias son aplicables en iluminación general en oficinas, supermercados, grandes superficies y en muchos entornos industriales y sociales. Las excelentes prestaciones cromáticas la hacen también adecuada para la iluminación de instalaciones deportivas, para retransmisiones de TV, estudios de cine, proyectores, etc.

4.2 ECONOMÍA DE LA LUZ

Los datos más importantes de las lámparas comentadas se resume en la siguiente tabla 4.2.1 (los datos pueden variar de unos fabricantes a otros):

Tabla 4.2.1 Parámetros de las bombillas y tubos habituales

TIPO	POTENCIA	FLUJO LUMINOSO (lm)	EFICIENCIA (lm/W)	R _a	TEMP. COLOR (K)	TIEMPO DE VIDA (horas)	PRECIO 1Mlm.h (\$)
INCANDESCENTE (120V)	60	865	14,4	100	2790	1000	7,4
HALOGENA TUNGSTENO (120V)	50	590	11,8	100	2750	2000	12
FLUORESCENTE TRIFOSFORICA	32	2850	84	78	4100	24000	1,6
FLUORESCENTE COMPACTO	15	900	51	82	2700	10000	3,9
VAPOR DE SODIO A BAJA PRESION	90	12750	123	-44	1800	16000	1,6
MERCURIO A ALTA PRESION	250	11200	34	50	3900	24000	3,8
VAPOR DE SODIO A ALTA PRESION	250	28000	108	22	2100	24000	1,3

HIDRUROS METÁLICOS	400	36000	60	65	4000	20000	2
INDUCCIÓN	55	3500	64	80	3000	100000	2

Desde el punto de vista económico, el coste de la luz producida por las diferentes fuentes es de gran interés. El coste de la luz puede ser estimado “a groso modo” a partir del coste de la lámpara y la potencia eléctrica consumida, dividido entre el número de lúmens producidos durante su tiempo de vida. Para 1Mlm·h, esto produce un coste de:

$$\frac{C_{\text{lámpara}} + C_{\text{energía}}}{L \cdot T} \quad (4.2.1)$$

donde $C_{\text{lámpara}}$ es el coste de la bombilla con el coste del circuito externo, si lo requiere la lámpara en cuestión, $C_{\text{energía}}$ es el precio de 1 kWh de energía, η es la eficiencia luminosa y P y T son la potencia y el tiempo de vida de la luminaria en cuestión, respectivamente. El primer término de la parte derecha de la ecuación 4.2.1 es el coste de la lámpara, y el segundo representa el coste de la energía consumida por 1Mlm·h. Se debe reseñar que la ecuación 4.2.1 no incluye el coste del mantenimiento y tratamiento de las bombillas de mercurio.

En la última columna de la tabla 4.2.1 se muestra el resultado de la estimación. El precio de la electricidad que fue utilizado es de 0,10\$. En esta tabla puede verse que el coste más bajo es la de peor calidad de luz, producida por las lámparas de vapor de sodio. Para fuentes de iluminación generales con índices de reproducción cromática altos, las fluorescentes no tienen competencia. Las lámparas de bombilla incandescente son que tienen un coste de luz más alto, pero con la calidad máxima, lo que hace que sean las preferidas en la iluminación residencial, unido al menor coste del dispositivo.

Como se indicó en la introducción, alrededor de un 20% de la energía consumida a nivel mundial es en iluminación. La introducción de nuevas fuentes de luz eficientes basadas en otros principios será muy importante para el ahorro energético.

CAPÍTULO 5 - DIODO EMISOR DE LUZ

Las bombillas convencionales dependen de su propia incandescencia o en la descarga de gases. Ambos fenómenos están asociados con grandes pérdidas energéticas por las altas temperaturas en que se producen. Los semiconductores ofrecen una forma de generación alternativa. La emisión de luz en semiconductores es debida a la recombinación radiativa entre electrones excedentes y huecos, producidos por la inyección de una corriente eléctrica con unas pérdidas energéticas muy bajas. Este fenómeno, llamado *inyección lumínica*, es la operación básica de todos los LEDs usados en la iluminación en estado sólido.

En este capítulo se expondrá los aspectos básicos de la inyección lumínica, los materiales utilizados, diseños eléctricos y las características electroluminosas de los LEDs de alto brillo.

5.1 DIODOS Y SEMICONDUCTORES

La electroluminiscencia, que es la emisión del exceso de radiación de un cuerpo negro excitado por un campo eléctrico, ocurre en varios sistemas en diferentes condiciones. La forma más eficiente de electroluminiscencia es la causada por la inyección de portadores de carga en semiconductores. A continuación se verá cómo son los semiconductores y qué propiedades tienen para favorecer este fenómeno.

Son elementos, como el germanio y el silicio, que a bajas temperaturas son aislantes eléctricos, pero a medida que se eleva la temperatura o bien por la adición de determinadas impurezas posibilitan la conducción. Su importancia en electrónica es inmensa en la fabricación de transistores, circuitos integrados, etc.

Los semiconductores tienen valencia 4, esto es 4 electrones en órbita exterior o de valencia. Los conductores tienen 1 electrón de valencia, los semiconductores 4 y los aislantes 8 electrones de valencia. Como vemos en la figura 5.1.1, los semiconductores se caracterizan por tener una parte interna con carga + 4 y 4 electrones de valencia.

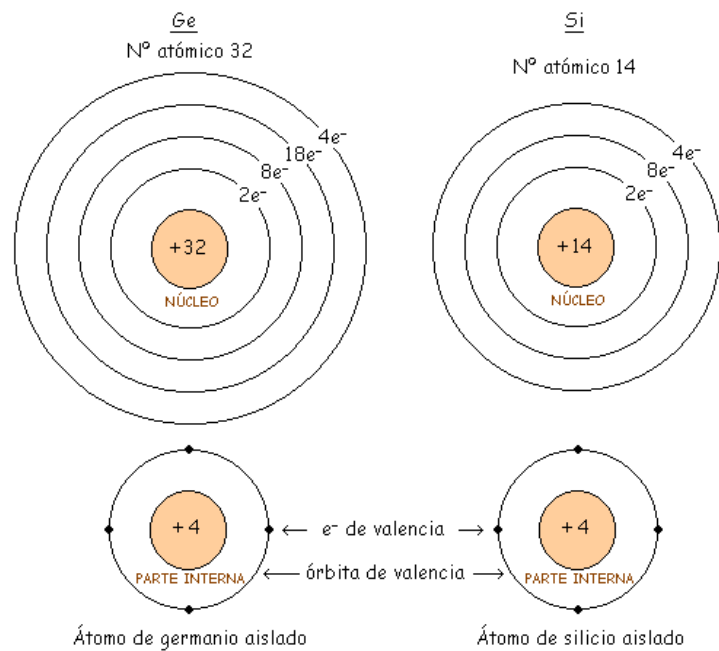


Figura 5.1.1 Estructura física del silicio y el germanio.

CRISTALES DE SILICIO

Al combinarse los átomos de Silicio para formar un sólido, lo hacen formando una estructura ordenada llamada cristal. Esto se debe a los "enlaces covalentes", que son las uniones entre átomos que se hacen compartiendo electrones adyacentes de tal forma que se crea un equilibrio de fuerzas que mantiene unidos los átomos de Silicio. Como se ve en la figura 5.1.2, cada átomo de silicio comparte sus 4 electrones de valencia con los átomos vecinos, de tal manera que tiene 8 electrones en la órbita de valencia:

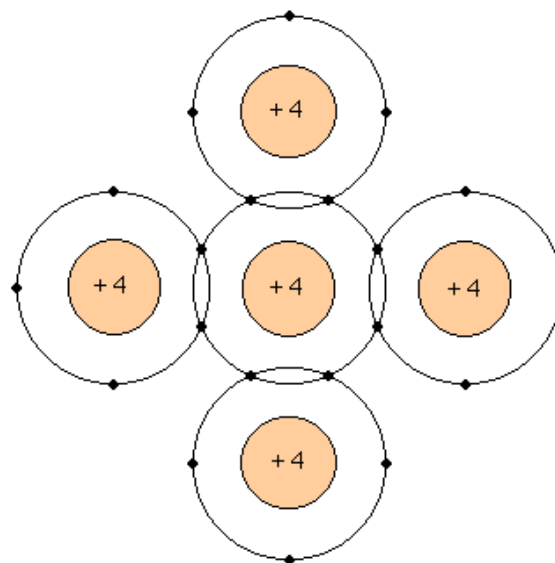


Figura 5.1.2 Estructura atómica del cristal de silicio.

La fuerza del enlace covalente es tan grande porque son 8 los electrones que quedan (aunque sean compartidos) con cada átomo, que es la configuración electrónica más estable. Romper esta configuración estable requiere de un aporte de energía adicional. Los 8 electrones de valencia se llaman electrones ligados por estar fuertemente unidos a los átomos.

El aumento de la temperatura hace que los átomos en un cristal de silicio vibren dentro de él: a mayor temperatura, mayor será la vibración, lo que hace que un electrón se puede liberar de su órbita, dejando un hueco, que a su vez atraerá otro electrón, etc... A 0 °K, todos los electrones son ligados y no hay vibraciones. A 300 °K o más, aparecen electrones libres (figura 5.1.3):

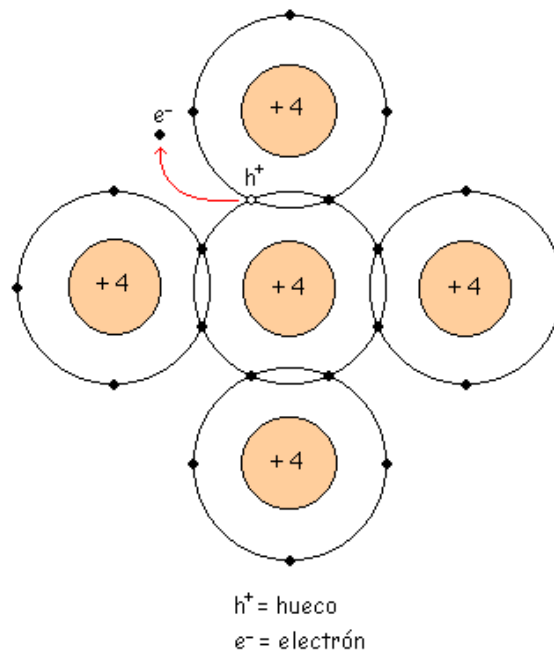


Figura 5.1.3 Formación de un par electrón-hueco en un cristal de silicio.

Esta unión de un electrón libre y un hueco se llama "recombinación", y el tiempo entre la creación y desaparición de un electrón libre se denomina "tiempo de vida". Según un convenio ampliamente aceptado se toma la dirección de la corriente como contraria a la dirección de los electrones libres.

DOPADO DE UN SEMICONDUCTOR

Si se introducen impurezas en forma de átomos de valencia 5 (arsénico, antimonio o fósforo) se tiene un cristal de silicio dopado con átomos que tienen un electrón de más. Así con una temperatura no muy elevada (a temperatura ambiente por ejemplo), el 5º electrón se hace electrón libre. Como solo se pueden tener 8 electrones en la órbita de valencia, el átomo pentavalente suelta un electrón, que será libre, como se ve en la figura 5.1.4:

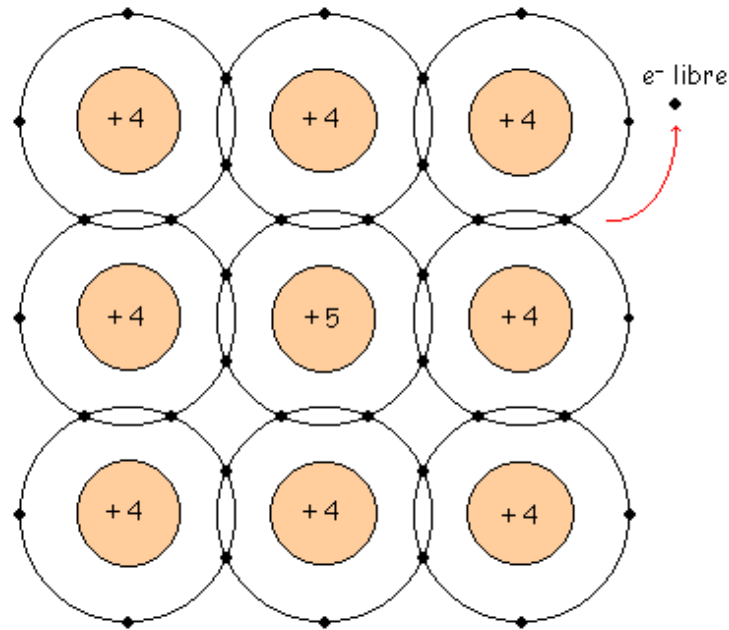


Figura 5.1.4 Dopado de un cristal de silicio con impurezas donadoras

A estas impurezas se les llaman "impurezas donadoras". Sigue habiendo electrones libres de generación térmica (muy pocos). El número de electrones libres es **n** (electrones libres/m³).

Sin embargo, si se introducen impurezas en forma de átomos de valencia 3 (aluminio, boro o galio), los átomos de valencia 3 tienen un electrón de menos: se tiene un hueco. Esto es, ese átomo trivalente tiene 7 electrones en la órbita de valencia. Al átomo de valencia 3 se le llama "átomo trivalente" o "Aceptor" y a estas impurezas se les llama "impurezas aceptadoras" (figura 5.1.5):

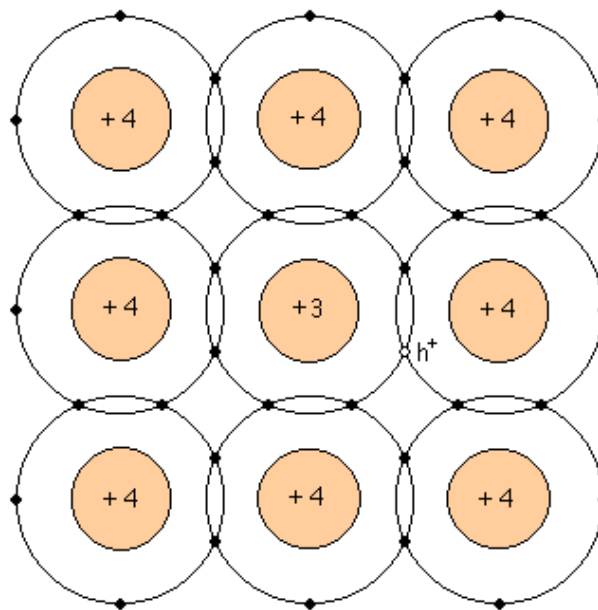


Figura 5.1.5 Dopado de un cristal de silicio con impurezas aceptadoras

Hay tantos huecos como impurezas de valencia 3 y sigue habiendo huecos de generación térmica (muy pocos). El número de huecos es p (huecos/m³). Por tanto, se tienen dos tipos de semiconductores:

- **Semiconductor tipo n**

Es el semiconductor que está impurificado con impurezas "donadoras", que son impurezas pentavalentes. Como los electrones superan a los huecos en un semiconductor tipo n, reciben el nombre de "portadores mayoritarios", mientras que a los huecos se les denomina "portadores minoritarios".

- **Semiconductor tipo p**

Es el que está impurificado con impurezas "aceptadoras", que son impurezas trivalentes. Como el número de huecos supera el número de electrones libres, los huecos son los portadores mayoritarios y los electrones libres son los minoritarios.

EL DIODO NO POLARIZADO

Los semiconductores tipo p y tipo n separados no tienen mucha utilidad, pero si un cristal se dopa de tal forma que una mitad sea tipo n y la otra mitad de tipo p, esa unión p-n tiene unas propiedades muy útiles y entre otras cosas forman los "Diodos". El átomo pentavalente en un cristal de silicio (Si) produce un electrón libre y se puede representar como un signo "+" encerrado en un círculo y con un punto relleno (que sería el electrón) al lado, ya que si el electrón es transportado, el átomo se queda cargado positivamente.

El átomo trivalente sería un signo "-" encerrado en un círculo y con un punto sin rellenar al lado (que simbolizaría un hueco), ya que si un electrón es atraído, el átomo se quedaría cargado negativamente. La unión de las regiones p y n se muestra en la figura 5.1.6:

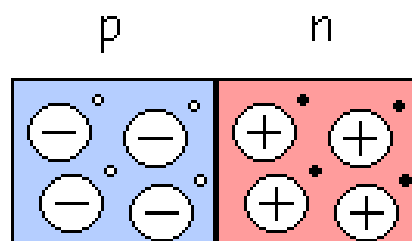


Figura 5.1.6 Unión p-n

Al juntar las regiones tipo p y tipo n se crea un "Diodo de unión" o "Unión p-n".

ZONA DE DEPLEXIÓN

Al haber una repulsión mutua, los electrones libres en el lado n se dispersan en cualquier dirección. Algunos electrones libres se difunden y atraviesan la unión. Cuando un electrón libre entra en la región p se convierte en un portador minoritario y el electrón cae en un hueco, el hueco desaparece y el electrón libre se convierte en electrón de valencia. Cuando un electrón se difunde a través de la unión crea un par de iones, en el lado n con carga positiva y en el p con carga negativa. Las parejas de iones positivo y negativo se llaman dipolos. Al aumentar los dipolos, la región cerca de la unión se vacía de portadores y se crea la llamada "zona de deplexión" (figura 5.1.7):

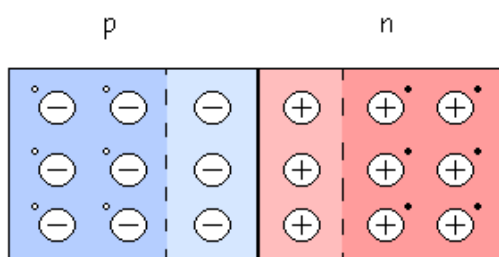


Figura 5.1.7 Zona de deplexión

BARRERA DE POTENCIAL

Los dipolos tienen un campo eléctrico entre los iones positivo y negativo, y al entrar los electrones libres en la zona de deplexión, el campo eléctrico trata de devolverlos a la zona n. La intensidad del campo eléctrico aumenta con cada electrón que cruza hasta llegar al equilibrio.

El campo eléctrico entre los iones es equivalente a una diferencia de potencial (figura 5.1.8) llamada "Barrera de Potencial" que a 25 °C vale:

- 0.3 V para diodos de Ge.
- 0.7 V para diodos de Si.

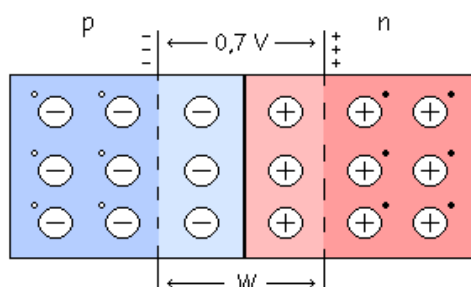


Figura 5.1.8 Barrera de potencial

W es la zona de carga espacial (z.c.e.)

5.2 LAS BANDAS DE ENERGÍA Y BARRERA DE ENERGÍA

Para poder comprender cómo funcionan los dispositivos semiconductores, es necesario conocer el modo en que los niveles de energía controlan la acción de una unión p-n.

1. ANTES DE LA DIFUSIÓN

En el instante inicial en que se juntan, instante cero, todavía no ha habido difusión (figura 5.2.1):

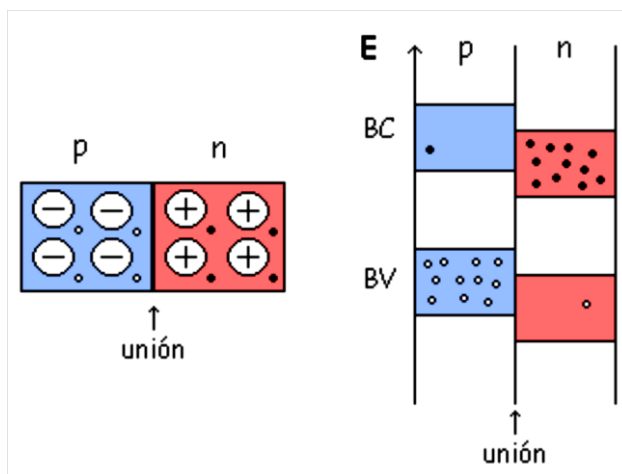


Figura 5.2.1 Unión p-n antes de la difusión

Las órbitas de la zona n son más pequeñas y por lo tanto los radios también son más pequeños. Como se ha dicho anteriormente, hablar de radios es equivalente a hablar de energías, entonces las energías también son más pequeñas. Esto es porque +5 atrae más fuertemente que +3. A mayor carga atrae con más fuerza, y disminuye así el radio, con lo que la energía es menor (figura 5.2.2):

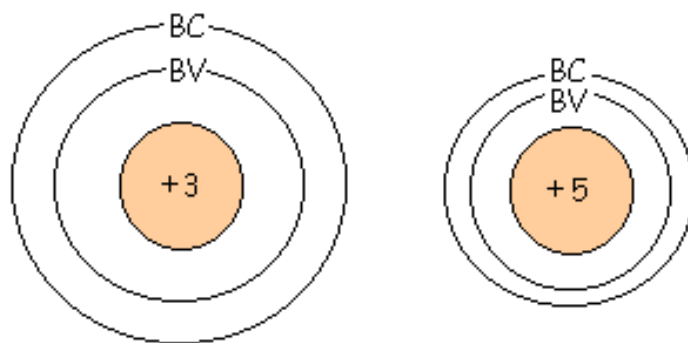


Figura 5.2.2 Órbitas de los electrones de átomos de impurezas aceptadoras tipo p (izquierda) y donadoras tipo n (derecha). Vemos cómo el radio es mayor en el semiconductor tipo p, luego tienen más energía.

2. EMPIEZA LA DIFUSIÓN Y LA RECOMBINACIÓN

Los electrones próximos a la unión cruzan de derecha a izquierda y se recombinan con los huecos. Cuando esto ocurre, en primer lugar un electrón que se encuentra en la banda de conducción del semiconductor n, cruza por difusión a la banda de conducción del semiconductor p, e inmediatamente se recombina con el hueco, pasando a un nivel inferior de energía (figura 5.2.3).

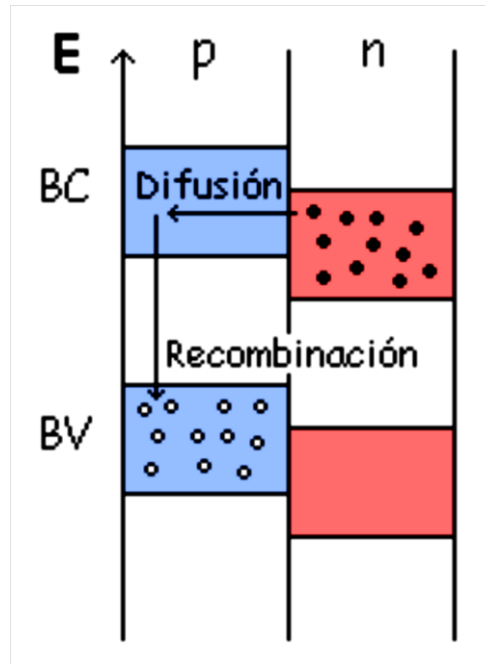


Figura 5.2.3 Difusión y recombinación de pares electrón-hueco

Cuando un electrón pasa de un nivel energético superior a otro inferior la energía del salto es liberada

- En forma de calor
- En forma de radiación, que puede ser visible o no.

De esta forma se empieza a crear una diferencia de potencial entre una parte y otra. Esta diferencia de potencial aumenta hasta que se establezca el equilibrio (Si a 0.7 V, Ge a 0.3 V).

El fenómeno inverso, es decir, el paso de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción implica un aporte de energía externa que será transformada en energía eléctrica. Si se utiliza la radiación solar como fuente de energía externa para excitar el electrón, el proceso es, en esencia la **fotogeneración**, o generación de corriente eléctrica a partir de una fuente de radiación (normalmente, radiación solar) y es la base física de los módulos fotovoltaicos.

3. EQUILIBRIO

En equilibrio las bandas se han desplazado hasta que el nivel inferior de p esté al mismo nivel que el nivel superior de n (figura 5.2.4) y se mantendrán en esa posición a no ser que se rompa el equilibrio. En este equilibrio no hay difusión o recombinación.

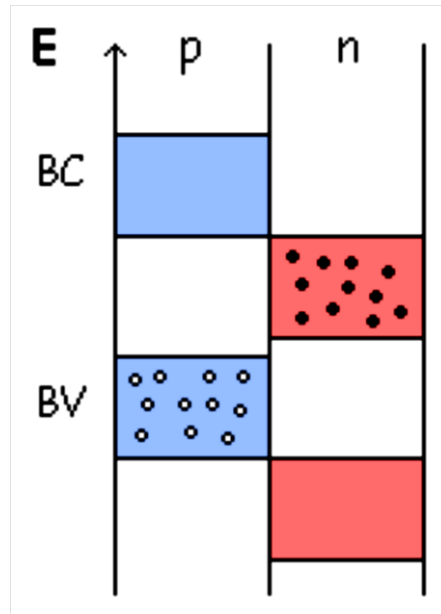


Figura 5.2.4 Bandas de energía en el equilibrio

4. POLARIZACIÓN DIRECTA

El equilibrio se rompe al aplicar tensión por medio de una fuente externa, que hace subir los niveles de la zona n (figura 5.2.5). En este caso, la fuente de tensión externa disminuye la barrera de potencial de la zona de carga espacial, permitiendo el paso de la corriente de electrones a través de la unión; es decir, el diodo polarizado directamente conduce la electricidad. Se produce cuando se conecta el polo positivo de la tensión externa a la parte P de la unión P - N y la negativa a la N:

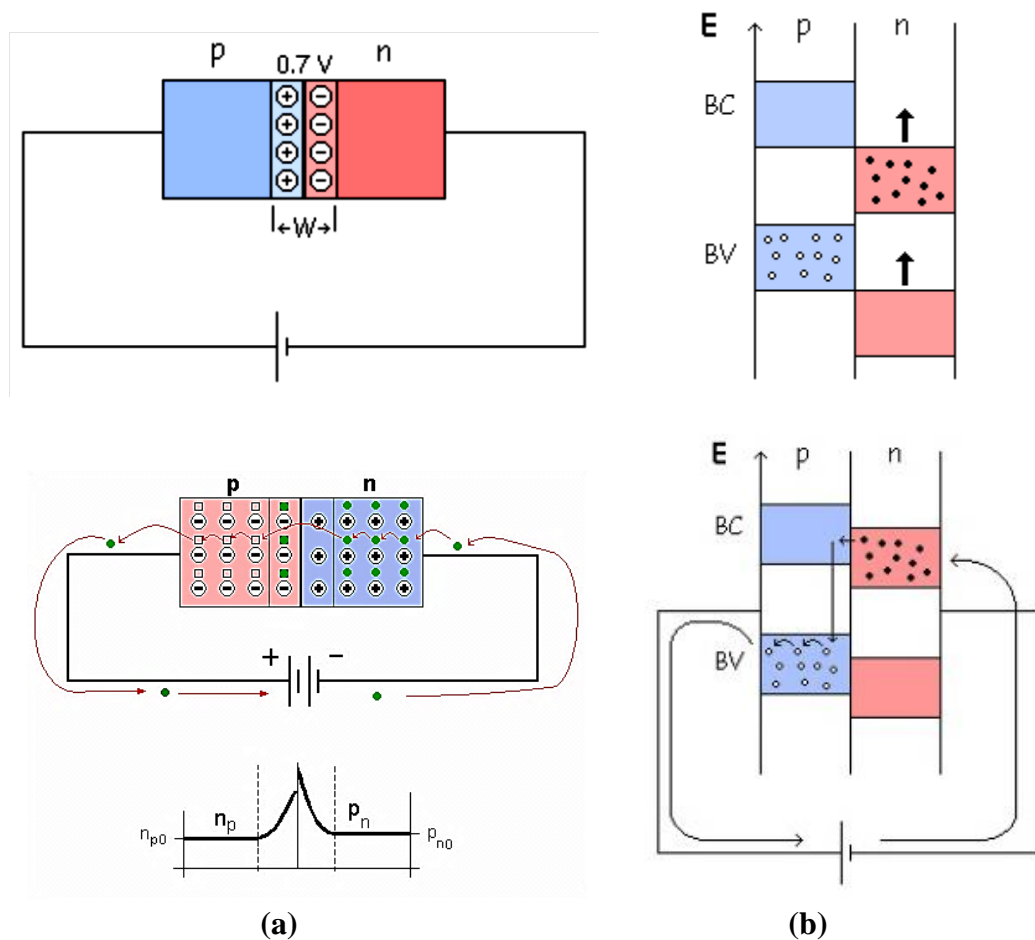


Figura 5.2.5 Movimiento de electrones en polarización directa (a) Esquema eléctrico (b) Bandas de energía

El polo negativo de la batería repele los electrones libres del cristal n, con lo que estos electrones se dirigen hacia la unión p-n. El polo positivo de la batería atrae a los electrones de valencia del cristal p, esto es equivalente a decir que empuja a los huecos hacia la unión p-n. Cuando la diferencia de potencial entre los bornes de la batería es mayor que la diferencia de potencial en la zona de carga espacial, los electrones libres del cristal n, adquieren la energía suficiente para saltar a los huecos del cristal p, los cuales previamente se han desplazado hacia la unión p-n. Una vez que un electrón libre de la zona n salta a la zona p atravesando la zona de carga espacial, cae en uno de los múltiples huecos de la zona p convirtiéndose en electrón de valencia. Una vez ocurrido esto el electrón es atraído por el polo positivo de la batería y se desplaza de átomo en átomo hasta llegar al final del cristal p, desde el cual se introduce en el hilo conductor y llega hasta la batería.

De este modo, con la batería cediendo electrones libres a la zona n y atrayendo electrones de valencia de la zona p, aparece a través del diodo una corriente eléctrica constante hasta el final.

5. POLARIZACIÓN INVERSA

Otra forma de romper el equilibrio es aplicando polarización inversa, es decir, tensión inversa. Como se ha comentado, en esta situación la zona de carga espacial aumenta, ya que la tensión externa atrae a los huecos y los electrones, y se ensancha hasta igualar la barrera de potencial al valor de la tensión externa (figura 5.2.6) .

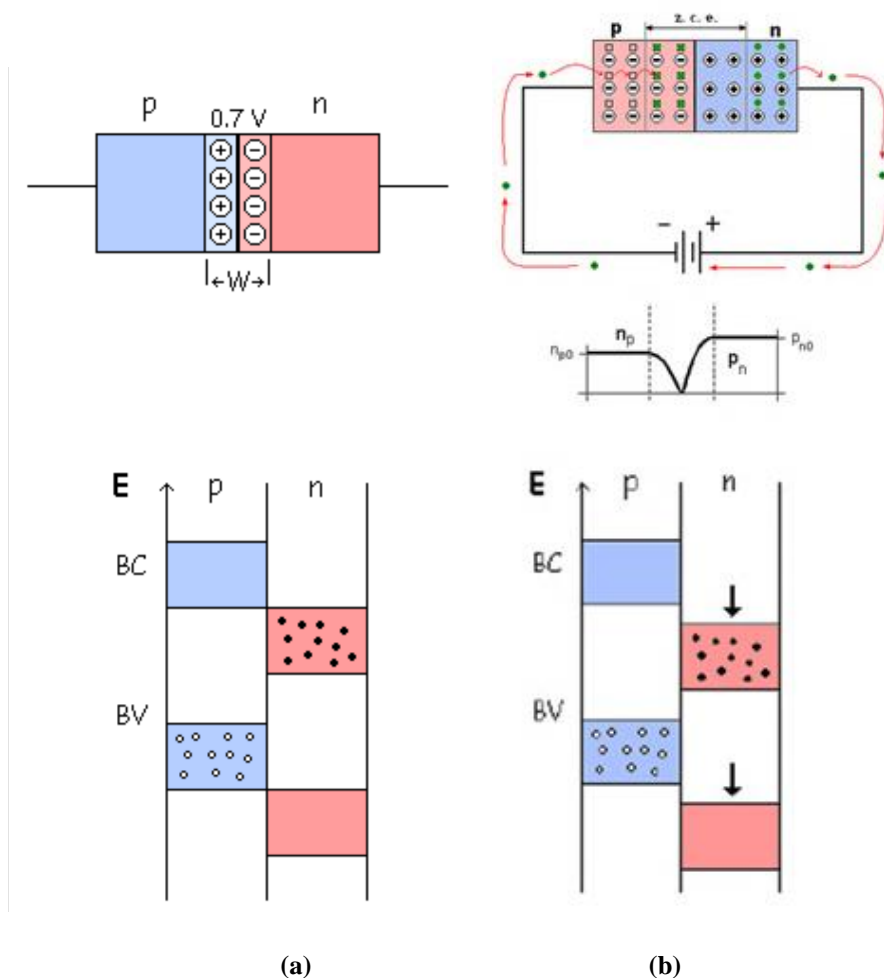


Figura 5.2.6 Esquema eléctrico y bandas de energía del diodo (a) En equilibrio; (b) Polarización inversa

El polo positivo de la batería atrae a los electrones libres de la zona n, los cuales salen del cristal n y se introducen en el conductor dentro del cual se desplazan hasta llegar a la batería. A medida que los electrones libres abandonan la zona n, los átomos pentavalentes que antes eran neutros, al verse desprendidos de su electrón en el orbital de conducción, adquieren estabilidad (8 electrones en la capa de valencia, ver semiconductor y átomo) y una carga eléctrica neta de +1, con lo que se convierten en iones positivos.

El polo negativo de la batería cede electrones libres a los átomos trivalentes de la zona p. Recordemos que estos átomos sólo tienen 3 electrones de valencia, con lo que una vez que han formado los enlaces covalentes con los átomos de silicio, tienen solamente 7 electrones de valencia, siendo el electrón que falta el denominado *hueco*. Cuando los

electrones libres cedidos por la batería entran en la zona p, caen dentro de estos huecos con lo que los átomos trivalentes adquieren estabilidad (8 electrones en su orbital de valencia) y una carga eléctrica neta de -1, convirtiéndose así en iones negativos.

Este proceso se repite una y otra vez hasta que la zona de carga espacial adquiere el mismo potencial eléctrico que la batería.

En esta situación, el diodo no debería conducir la corriente; sin embargo, debido al efecto de la temperatura se formarán pares electrón-hueco (ver semiconductor) a ambos lados de la unión produciendo una pequeña corriente (del orden de $1\ \mu\text{A}$) llamada **corriente inversa de saturación I_s** . Además, existe también una **corriente superficial de fugas I_f** , la cual, como su propio nombre indica, conduce una pequeña corriente por la superficie del diodo; ya que en la superficie, los átomos de silicio no están rodeados de suficientes átomos para realizar los cuatro enlaces covalentes necesarios para obtener estabilidad. Esto hace que los átomos de la superficie del diodo, tanto de la zona n como de la p, tengan huecos en su orbital de valencia con lo que los electrones circulan sin dificultad a través de ellos. No obstante, al igual que la corriente inversa de saturación, la corriente superficial de fugas es despreciable.

5.3 LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL DIODO

El diodo es un elemento semiconductor que permite o impide el paso de la corriente en función de la tensión de polarización en bornes. El diodo LED es un tipo de diodo que emite luz cuando conduce una corriente eléctrica. Es preciso analizar la respuesta del diodo, dando distintos valores a la tensión de polarización y midiendo las tensiones y corrientes por el diodo (figura 5.3.1):

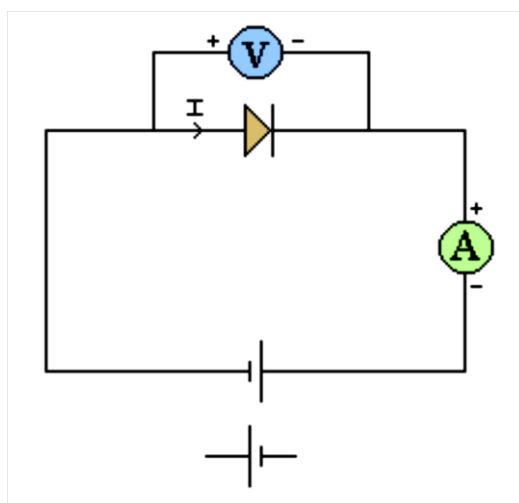


Figura 5.3.1 Diodo de unión. Esquema eléctrico

- **Polarización directa**

Hay que vencer la barrera de potencial (superar la tensión umbral V_δ) para que el diodo conduzca. El diodo se comporta aproximadamente como una resistencia de pequeño valor a partir de esta tensión (figura 5.3.2):

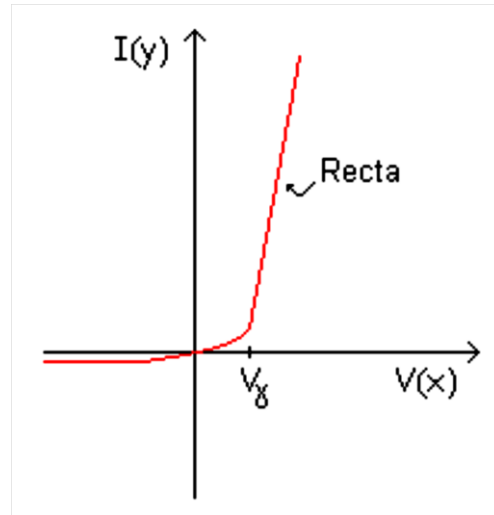


Figura 5.3.2 Polarización inversa. Característica I-V

- **Polarización inversa**

En polarización inversa se conduce una corriente formada por la suma de los valores de la corriente I_s y la corriente de fugas I_f . Al llegar a V_R el diodo se rompe por avalancha:

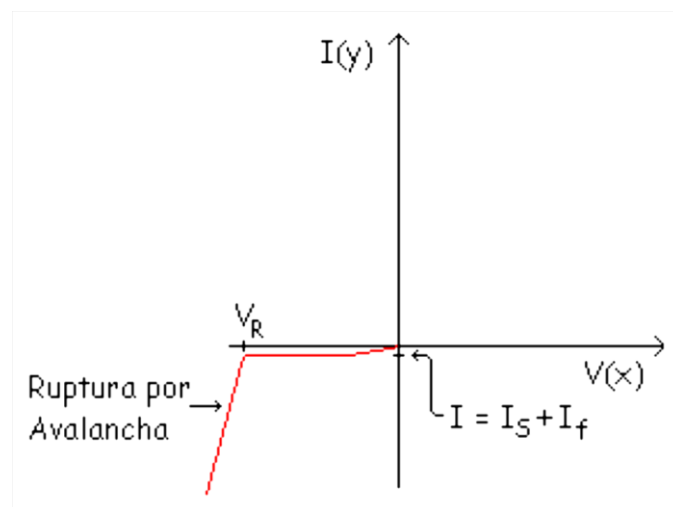


Figura 5.3.3 Polarización inversa. Característica I-V

Se puede apreciar el codo que se produce en el cambio de polarización inversa a polarización directa. También se aprecia una característica lineal de la corriente a partir de la tensión de polarización V_γ . Esta relación lineal entre tensión y corriente hace más fácil la regulación. Los valores de la curva característica dependen de los materiales utilizados en el LED. Para LEDs de colores CREE MC-E, las curvas características en polarización directa a 25°C dadas por el fabricante pueden verse en la figura 5.3.4:

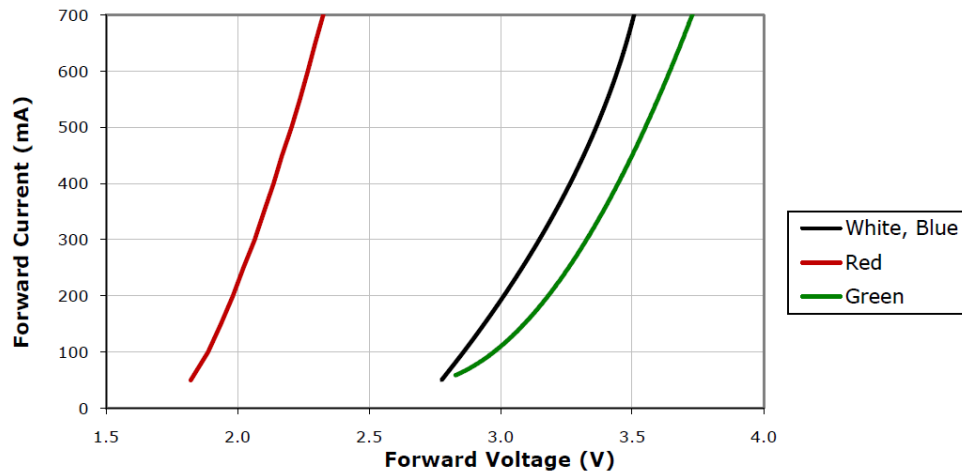


Figura 5.3.4 Curva característica I-V para LEDs RGBW CREE MC-E

5.4 MATERIALES SEMICONDUCTORES PARA LEDS DE ALTO BRILLO

Un LED tiene las características eléctricas de un diodo, lo cual significa que permite un flujo de corriente en polarización directa y lo impide en polarización inversa. El material semiconductor utilizado para su fabricación y su nivel de impurezas determinarán si el diodo emite luz, o no, y la longitud de onda particular (figura 5.4.1)

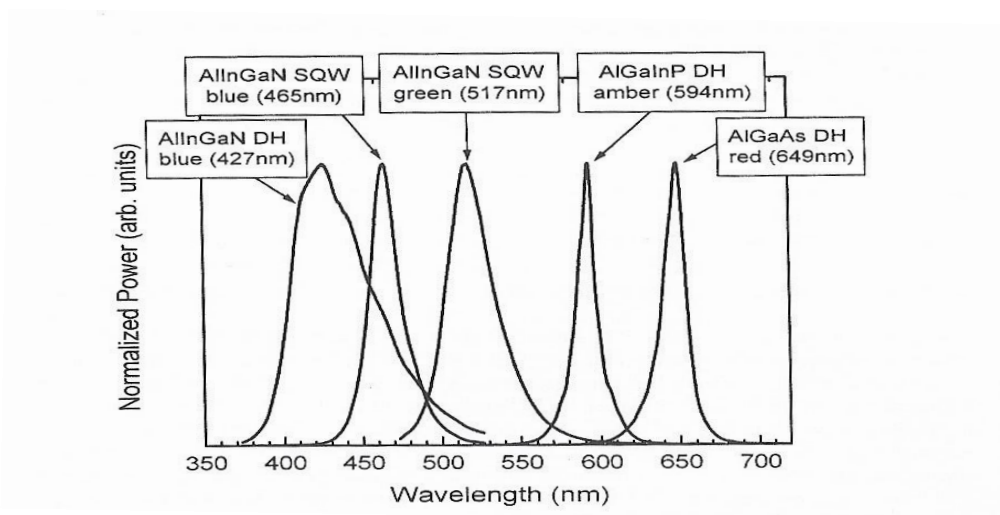


Fig. 5.4.1 Ejemplos de espectros electroluminiscentes de LEDs de alto brillo. La intensidad pico ha sido normalizada para una mejor claridad.

Los electrones del material semiconductor del diodo deben tener la capacidad de poder dar grandes saltos entre la banda de conducción y las bandas más bajas. El tamaño del salto determina la frecuencia de emisión de fotones [14]. Por tanto, el requerimiento universal para obtener luz, es que las bandas de energía del semiconductor y la energía de los fotones de radiación visible y cercana a ultravioleta encajen. La energía de un fotón y la longitud de onda se relacionan mediante la siguiente ecuación:

No todos los materiales semiconductores que cumplan esta condición son válidos. Una alta tasa de recombinación radiativa solo puede ser conseguida con **semiconductores directos**, en los que el mínimo de la banda de conducción coincide con el máximo de la banda de valencia; si un electrón en la banda de valencia “saltara” la banda prohibida, caería directamente en la banda de conducción. Al aplicar una energía externa al semiconductor (voltaje, calor, etc) los electrones logran pasar de la banda de valencia a

la de conducción; al quitar esta excitación, los electrones tienden a regresar a la banda de valencia, emitiendo la energía que absorbieron en forma de un fotón de luz.

Por otra parte, en un semiconductor indirecto las dos bandas no coinciden. Al aplicarle una energía externa y luego quitar la excitación, los electrones regresan a la banda de valencia, pero la energía que recibieron ya no la liberan en forma de un fotón de luz sino en forma de calor. Por ello, en el silicio (Si), un material de gap indirecto, la recombinación radiante es muy pobre. Dicho material, que domina todas las demás áreas de la electrónica, no es un material utilizado cuando se habla de emisión de luz.

Las consideraciones a tener en cuenta a la hora de elegir un material para la fabricación de LEDs son las siguientes:

- *Energía de emisión:* La luz emitida por un dispositivo es cercana a la anchura de la banda prohibida del semiconductor. El deseo de tener una emisión energética particular tiene una serie de motivaciones. Por una parte si buscamos colores determinados para la emisión de luz se debe elegir un material para cada color. A menudo se seleccionan aleaciones de materiales ya que tienen una mayor flexibilidad en el rango de anchuras de banda asequibles.
Por otra parte, si se requieren LEDs como fuentes de emisión para comunicaciones ópticas se han de elegir materiales que puedan emitir en las longitudes de onda de $1,55\mu\text{m}$ o $1,3\mu\text{m}$, pues en dichas longitudes de onda se tienen dos mínimos en pérdidas energéticas en la transmisión a través de la fibra óptica.
- *Disponibilidad del sustrato:* Casi todas las fuentes luminosas en optoelectrónica dependen de las técnicas de crecimiento epitaxial cristalino empleadas en las que se produce el crecimiento de una fina capa activa (de pocas micras) sobre un sustrato (el cual es de alrededor de $200\mu\text{m}$). En tecnología de crecimiento epitaxial es muy importante la disponibilidad de sustratos de alta calidad. Si no es posible encontrar un sustrato cuya estructura cristalina sea congruente con la de la capa activa del dispositivo, éste podrá presentar dislocaciones u otro tipo de defectos que pueden afectar negativamente a su funcionamiento.

Los compuestos semiconductores de los grupos III-V (InP, GaAs, InN, GaN, y AlN) tienen bandas de energía que se superponen a la región espectral deseada, y pueden formar aleaciones de semiconductores directos muy robustas. Como puede verse en la tabla 5.4.1, compuestos de mezclas de cationes de ternas y cuartetos de aluminio, galio e indio, y aniones de arsénico, fósforo o nitrógeno son los básicos en la actual industria de LEDs de alto brillo.

Tabla 5.4.1. Colores generados por diversos semiconductores (*Fuente: Wikipedia en inglés*)

Color	λ [nm]	Semiconductor
IR*	>760	GaAs, AlGaAs
Rojo	610–760	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP
Naranja	590–610	GaAsP, AlGaInP, GaP
Amarillo	570–590	GaAsP, AlGaInP, GaP
Verde	500–570	InGaN, GaN, GaP, AlGaInP, AlGaP
Azul	450–500	ZnSe, InGaN, SiC, Si
Violeta	400–450	InGaN
UV*	<400	C, AlN, AlGaInN

* No es considerado un color.

En la figura 5.4.1 se muestra los materiales que emiten las longitudes de onda sobre el diagrama de cromaticidad:

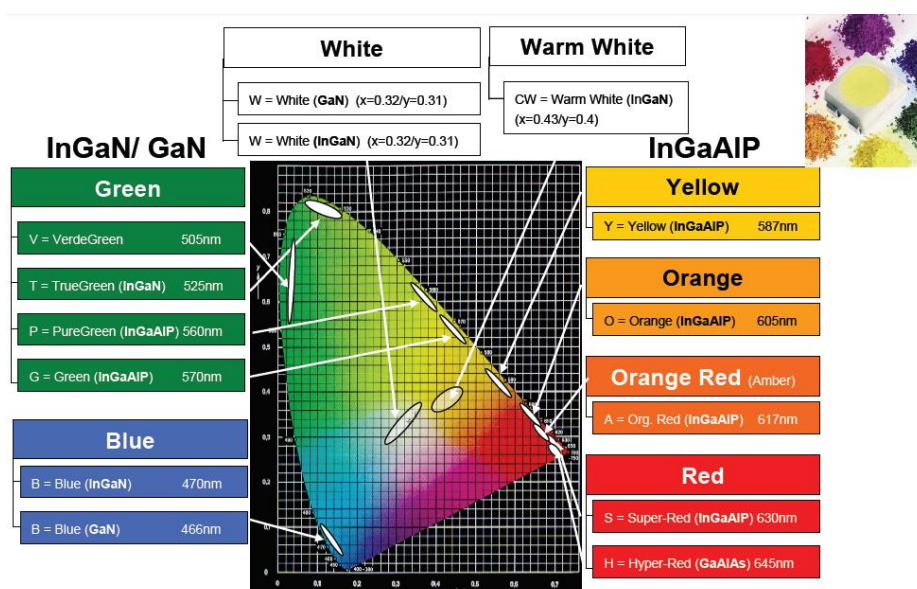


Fig 5.4.1 Materiales emisores de luz distribuidos en el diagrama de cromaticidad

Las aplicaciones de iluminación hacen que la luz blanca sea la más importante. Para ello, además de la posibilidad mezcla de colores ya vista, hay otro método para su obtención que consiste en utilizar un LED de color azul de longitud de onda entre 455 y 465nm y recubrirle con una capa fosfórica. El fósforo se utiliza como convertidor amarillo de posición fija en el espectro. La temperatura del color blanco obtenido dependerá de la concentración de fósforo. De esta manera se aprovecha el alto rendimiento de los materiales que emiten en longitudes de onda de emisión azul.

5.5 SOPORTE FÍSICO Y CONTACTOS

Inicialmente, el semiconductor se unía a un reflector como puede verse en la figura 5.5.1. Este LED tenía aplicaciones de señalización. La tecnología tuvo que mejorar varios aspectos del convencional para poder generar más luz a partir de más potencia y desarrollar los LED de alta potencia (HPLED):

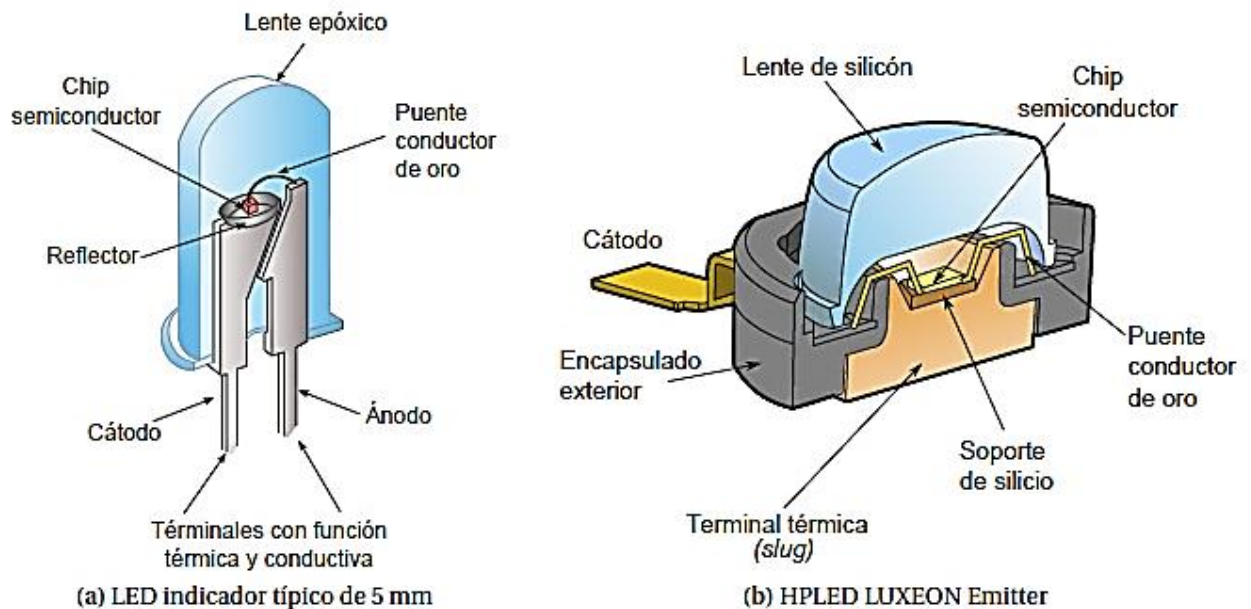


Fig. 5.5.1 Estructura interna; (a) LED; (b) HPLED

- *Terminal térmica (slug):* el tratamiento del calor en el LED es una de las claves para lograr un mayor flujo luminoso por dispositivo, ya que la mayor parte de calor se genera en la unión p-n y depende de la cantidad de corriente que pasa por ella. El calentamiento del LED convencional limita su uso a bajas potencias y corrientes de operación (alrededor de 20 mA). A 20 mA, un LED convencional de 5 mm de luz blanca genera cerca de 1 lm.

Los HPLED son diseñados para manejar altas potencias y grandes cantidades de calor. El encapsulado soporta el calor generado y puede transmitirlo a disipadores de calor externos mediante la terminal térmica, la cual se encarga de sacar el calor fuera del chip semiconductor; mientras que en el LED convencional son el encapsulado y las mismas terminales ánodo y cátodo las que disipan el calor (figura 5.5.1).

- *Chip semiconductor:* El chip semiconductor de un HPLED es mucho más grande y puede generar más luz; además su forma está optimizada para extraer la luz de manera más eficiente.
- *Material del lente:* La lente de un HPLED está hecho de plásticos especiales como silicón, el cual tiene una vida más larga que la resina epóxica de los LED convencionales. Los materiales epóxicos tienden a deteriorarse a temperaturas altas, en las cuales la resina se torna amarillenta, lo cual reduce la luz generada.

- *Resistencia del encapsulado:* A temperaturas muy bajas los encapsulados tradicionales se vuelven rígidos y quebradizos, y a temperaturas altas se expanden y se ablandan. Los materiales para el encapsulado de los HPLED no sufren cambios en temperaturas extremas (su rango de temperatura es de -40 a 120°C). El encapsulado y la lente del HPLED son mecánicamente más robustos, son resistentes a golpes y vibraciones, a diferencia de las lámparas incandescentes y halógenas que son bastante frágiles.
- *Reducción gradual de la luz:* Todos los tipos de LED presentan el problema de la reducción gradual de luz durante su tiempo de operación. Como se ve en la figura 5.5.2, los LED convencionales tienen una reducción significativa de luz comparado con el HPLED.

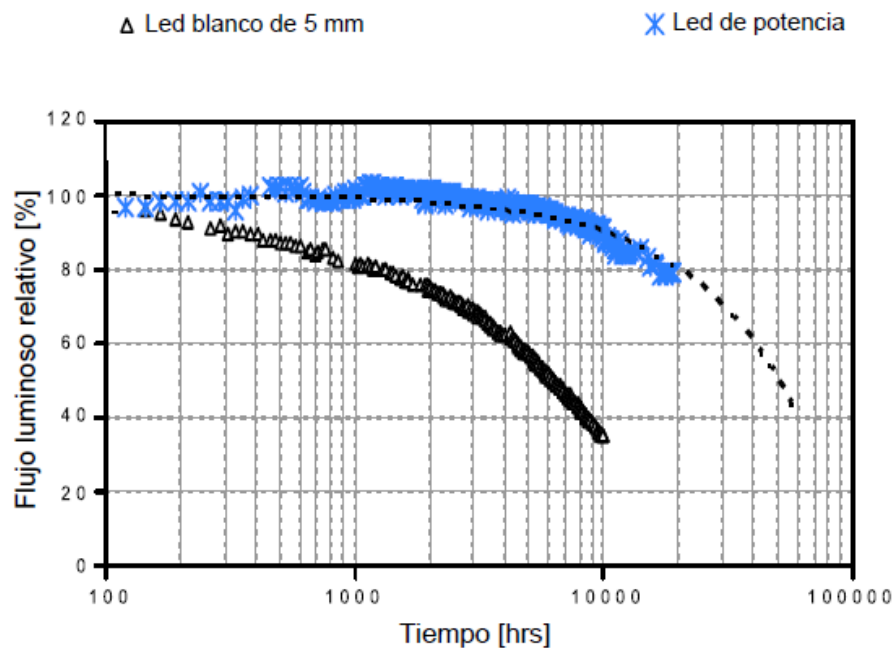


Fig. 5.5.2 Comparación del tiempo de vida de un LED convencional y de un HPLED

5.6 MODELOS ELÉCTRICOS

El LED puede ser modelado para su análisis y simulación de varias opciones. En la figura 5.6.1 se muestran las principales:

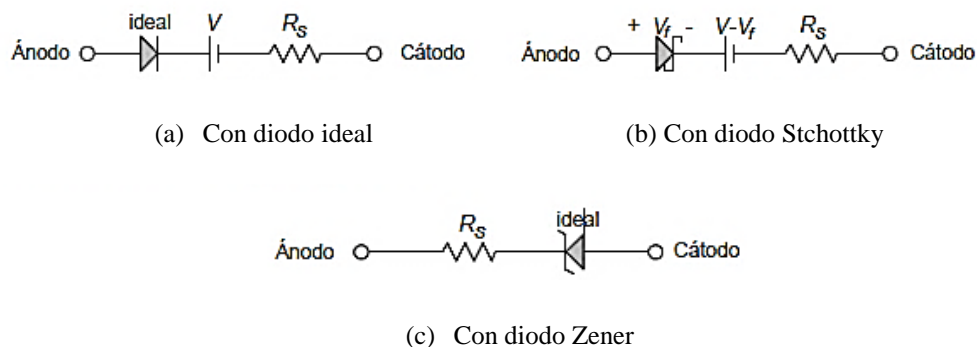


Fig. 5.6.1 Modelo simplificado del LED; (a) Con diodo ideal; (b) Con diodo Schottky; (c) Con diodo Zener

- *Modelo SPICE*: El programa de simulación con énfasis en circuitos integrados (SPICE, Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis) es un simulador de propósito general para electrónica analógica y sus modelos se han convertido en estándar de simulación. Los modelos SPICE para HPLED se basan en el modelo general del diodo, el cual utiliza los parámetros mostrados en la tabla 5.6.1. El modelo SPICE más confiable es el que proporciona el fabricante, aunque por el momento no hay muchos modelos SPICE publicados para los HPLED.

Tabla 5.6.1 Parámetros utilizados en el modelo SPICE del diodo.

Nombre	Parámetro	Unidad	Nombre	Parámetro	Unidad
IS	Corriente de saturación	A	XTI	Exponente de temperatura de la corriente de saturación	-
RS	Resistencia óhmica	Ω	KF	Coeficiente de ruido fluctuante	-
N	Coeficiente de emisión	-	AF	Exponente de ruido fluctuante	-
TT	Tiempo de transitorio	s	BV	Voltaje de ruptura inverso	V
CJO	Capacitancia de unión sin polarizar	F	FC	Coef. para la fórmula de capacitancia de agotamiento en pol. directa	-
VJ	Potencial de la unión	V	IBV	Corriente en el voltaje de ruptura	A
M	Coeficiente de graduación	-	TNOM	Temperatura de medición	$^{\circ}\text{C}$
EG	Energía de banda	eV			

- *Modelo con diodo Schottky*: Cuando se propuso este modelo (2005) el fabricante aún no había publicado sus propios modelos SPICE. Para modelar el HPLED se empieza tomando un diodo ideal considerando las pérdidas óhmicas o resistivas mediante la resistencia interna del LED, representada por Rs. El valor de la resistencia interna se debe obtener caracterizando el HPLED a utilizar. Se obtiene la curva característica del HPLED, V_f vs I_f y, linealizando (figura 5.6.2) en un intervalo que incluya a la corriente de operación del HPLED, se obtiene una ecuación de la forma $V_f = V + R_s I_f$. De esta manera el modelo queda como muestra la figura 4.6.1b.

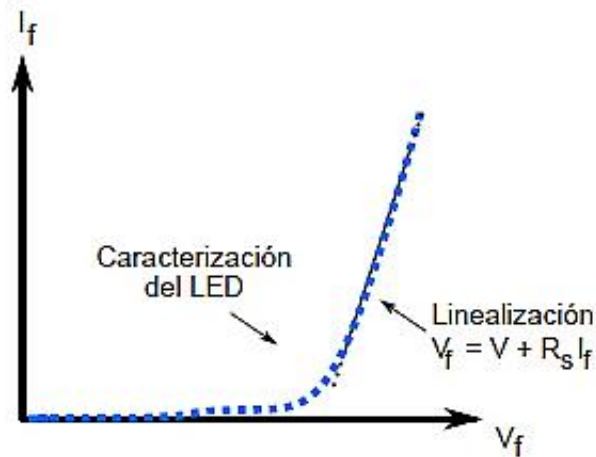


Fig.5.6.2 Linealización de la curva característica del LED

Para simularlo en SPICE se propone utilizar un diodo Schottky en lugar de un diodo ideal. Para esto se debe restar al voltaje V el voltaje de polarización directa del diodo Schottky utilizado V_f , quedando el modelo propuesto como muestra la figura 5.6.1b.

Este modelo solo se puede utilizar en el intervalo de voltaje y corriente en que fue linealizada la curva V_f vs I_f . Tampoco puede ser utilizado en altas frecuencias, ya que no se consideró la capacitancia de unión del LED.

- *Modelo con diodo Zener:* Ya que cada LED mantiene un voltaje en sus terminales casi constante alrededor de la corriente de trabajo, es posible verlo como una carga de voltaje constante. Este comportamiento es similar al de un diodo Zener polarizado inversamente. Basado en ello, se puede utilizar como modelo un diodo Zener ideal; la resistencia interna se puede obtener linealizando la curva V_f vs I_f como en el modelo con diodo Schottky. Se recomienda utilizar este modelo para probar el sistema de alimentación real en la etapa de prototipo, ya que en caso de un fallo que lleve a la destrucción de la carga, es más barato reemplazar un diodo Zener que un LED. Sin embargo no existen diodos Zener comerciales para todos los voltajes, lo que limita su uso en la etapa de pruebas.

5.7 EFECTOS DE LA TEMPERATURA

El coeficiente térmico para el voltaje en polarización directa es negativo, lo cual hace que el aumento del calor en la unión tenga los siguientes efectos:

- Disminuye el voltaje de polarización V_f .
- Disminuye la corriente de polarización directa I_f .
- Disminuye el flujo luminoso (figura 5.7.1).
- El LED cambia un poco el color de la luz que emite (corrimiento del color).
- Operado a altas temperaturas, el LED disminuye su vida útil.

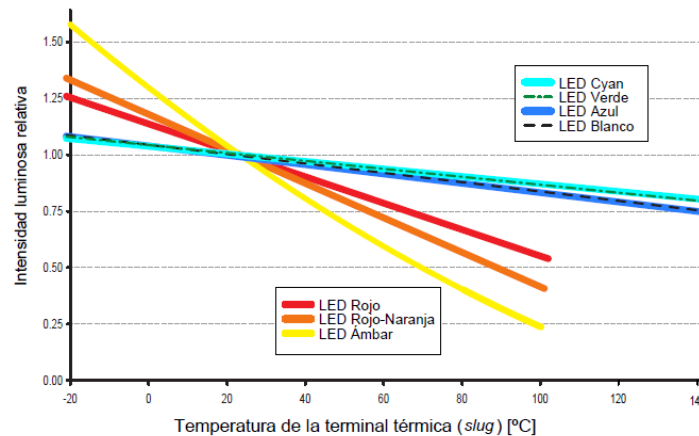


Fig. 5.7.1 Comportamiento del flujo luminoso del LED con la temperatura.

Como se observa en la figura 5.7.1, los LED de color rojo, rojo-naranja y ámbar son los que tienen mayor cambio en sus propiedades por el incremento de la temperatura. Abordaremos más profundamente el efecto de la temperatura en el siguiente capítulo.

5.8 PATRONES DE RADIACIÓN

El patrón de radiación describe la intensidad relativa de luz de la fuente en varias direcciones; en otras palabras, describe como se distribuye el flujo luminoso emitido en el espacio. Dependiendo de la aplicación, se utiliza el patrón de radiación que direcciona la luz de manera conveniente.

El patrón de radiación puede ser descrito por una gráfica de dos ejes, flujo luminoso relativo en función del ángulo con respecto al eje óptico. Existen varios ángulos en el patrón de radiación que definen como es el flujo luminoso; el ángulo total incluido, que es el ángulo en el que se capta el 90% del flujo luminoso total; el ángulo de vista, que se define como $2\theta_{1/2}$, en donde $\theta_{1/2}$ es el ángulo en donde la intensidad luminosa es la mitad de la intensidad luminosa pico; y el ángulo de intensidad pico, que es el ángulo en el que la intensidad luminosa alcanza el valor pico.

La forma de la lente que viene integrado en el encapsulado del LED y la estructura interna del HPLED (con o sin reflector) es lo que determina el patrón de radiación. Los patrones de radiación más comunes para LED se muestran en la figura 5.8.1:

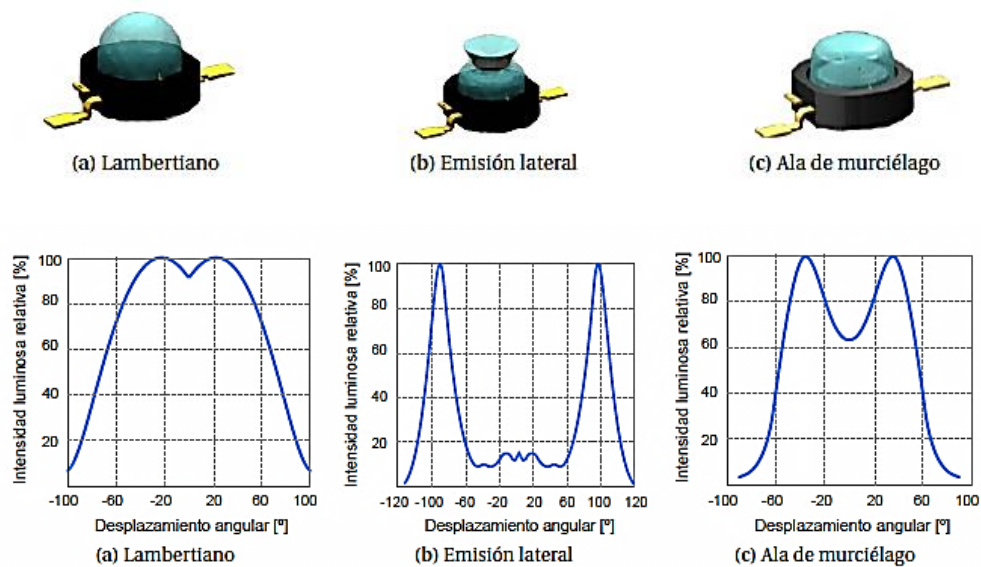


Fig. 5.8.1 Patrones de radiación; (a) Lambertiano; (b) Emisión lateral; (c) Ala de murciélago

- *Lambertiano*: El patrón lambertiano (figura 5.8.1a) es el más común y por lo tanto considerado como de propósito general. Una lente lambertiano produce una salida de luz distribuida uniformemente siguiendo una curva cosenoidal; en consecuencia el LED puede ser visto como una fuente de luz puntual. Los HPLED con este patrón de radiación no tienen en su estructura un reflector y la lente tiene una superficie en forma de cúpula o domo.
- *Emisión lateral (side emitting)*: Los que emiten luz con este patrón tienen en su estructura un reflector interno (figura 5.8.1b), donde la luz que sale es colimada y redireccionada 90° por un reflector cónico, por el que la luz sale en el plano horizontal. Esta combinación resulta en un haz de luz estrecho que se expande 360° alrededor del eje en el plano horizontal. La intensidad de luz no es uniforme en los 360° del eje en el plano horizontal, ya que el chip LED no es circular, sino cuadrado.

Los sistemas de iluminación que usan este tipo de patrón de radiación requieren de reflectores externos eficientes para aprovechar mejor la luz que producen.

- *Ala de murciélago (batwing)*: El reflector interno en los LED que emiten este patrón de radiación hace que la mayor intensidad de luz se haga a partir de los $\pm 40^\circ$, y produce escasez de luz en el centro (figura 5.8.1c). Comparado con el lambertiano, el lente de ala de murciélago tiene una superficie superior plana. Este patrón puede producir un haz de luz estrecho, pero a diferencia del de emisión lateral no suele requerir un reflector externo.

5.9 EFICIENCIA Y EFICACIA

A continuación se va a comparar la eficiencia del LED con las eficiencias de las lámparas de las tecnologías ya vistas en el capítulo anterior.

5.9.1 ASPECTOS GENERALES

La eficiencia en iluminación se puede definir como la capacidad que tiene un sistema que emite luz para conseguir el efecto que pretende: iluminar un espacio o una superficie. Este sistema de iluminación está compuesto por una fuente de luz y por aquel dispositivo que distribuye la luz emitida por la fuente y que protege y contiene todos los accesorios eléctricos, mecánicos y ópticos para su correcto funcionamiento, es decir, la luminaria. Una correcta combinación y diseño de estos dos elementos, fuente de luz y luminaria, definirán al sistema lumínico como más o menos eficiente.

En la tabla 5.9.1 podemos ver el balance energético para los principales tipos de luminarias:

Tabla 5.9.1 Balance energético de luminarias

	INCANDESCENTE	FLUORESCENTE	HALOGENUROS METÁLICOS	LED
LUZ VISIBLE	8%	21%	27%	20~30%
INFRARROJO	73%	37%	17%	0%
ULTRAVIOLETA	0%	0%	19%	0%
ENERGÍA TOTAL RADIANTE	81%	58%	63%	20~30%
CALOR (CONDUCCIÓN + CONVECCIÓN)	19%	42%	37%	70~80%
TOTAL	100%	100%	100%	100%

En la tabla se muestra que la luminaria incandescente solo aprovecha el 8% de la energía que consume para convertirla en luz visible. También se aprecia que de la energía consumida por la luminaria LED, el 20~30% produce luz visible y el resto se pierde en forma de calor. Por tanto, el LED no emplea energía en producir radiaciones de onda no aprovechables, por debajo del infrarrojo y por encima del ultravioleta, y pone de manifiesto la importancia capital que tiene el mantener la temperatura en el

rango óptimo. En la figura 5.9.1 se muestra la evolución de la eficiencia de las diferentes tecnologías a lo largo del tiempo:

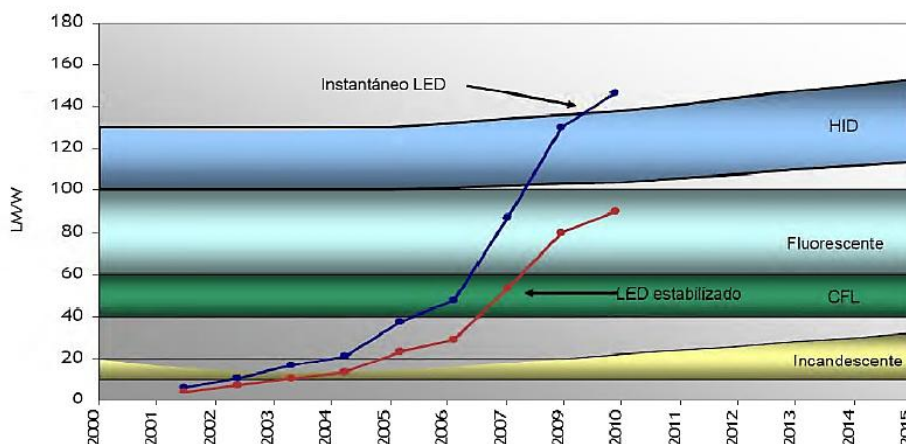


Figura 5.9.1 Evolución de la eficiencia

La curva azul representa la eficiencia del LED a 25°C, mientras que la curva roja representa la eficacia que caracteriza al LED a la temperatura normal de trabajo. Por ello, en el primer caso se habla de eficiencia instantánea y en el segundo caso, del LED estabilizado. Se puede ver que desde el año 2006 la tecnología LED ha tenido un incremento considerable de eficacia y se espera que este crecimiento continúe durante los próximos años, aunque en menor medida. Esta evolución prevista se hace más importante al comparar la eficiencia del LED con la de los halogenuros metálicos, como se muestra en la tabla 5.9.2:

Tabla 5.9.2 Eficacia del LED y de otras lámparas según el estado de la tecnología hoy

Tipo de luz	Lm / W (Datasheet)	Lm / W (Usable)**	Tiempo de vida [hrs]	CRI
Incandescencia	15	12	500	90
Halógena	20	16	1.200	100
Halogenuros Metálicos	70-90	56-72	12.000	85
Fluorescente	60-90	39-60	8.000	80
Sodio Baja presión	120-150	84-105	16.000	25
Sodio Alta presión	95-130	76-96	28.000	45
Led	90-120	70-90	> 50.000	>75

** Usable se refiere a que es luz que ha salido de la luminaria hacia su objetivo

En esta tabla se ve que las luminarias con mayor eficacia son las de sodio a baja presión, a costa de un pobre índice de reproducción cromática. Se podría pensar fácilmente que el menor valor de lumens por vatio del LED se compensa con el mayor valor de CRI, pero hay que tener en cuenta que el valor que nos da el fabricante del diodo se refiere a

una medición del flujo de un LED en un encendido instantáneo en condiciones de laboratorio ($T_a=25^\circ$), y que este valor decrece con la temperatura, como puede verse en la figura 5.9.2:

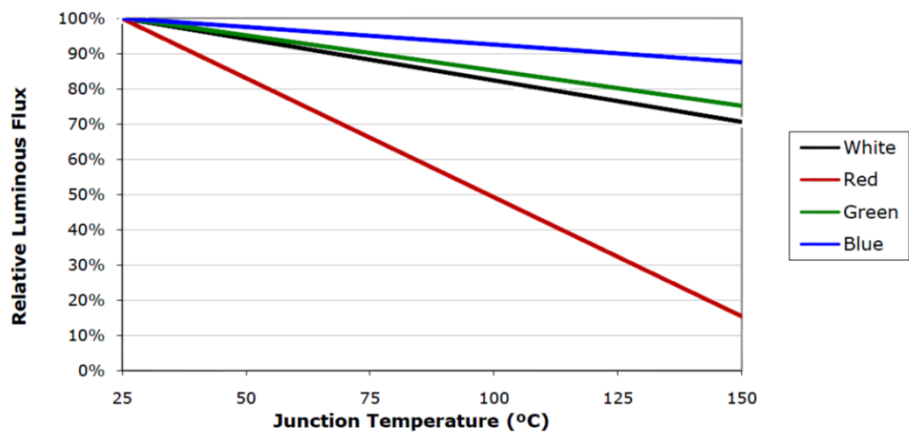


Figura 5.9.2 Flujo relativo en función de la temperatura de la unión del diodo LED (datos procedentes de datasheet del modelo CREE MC-E COLOR)

Por tanto, se puede concluir que el valor de eficacia lumen/vatio dado por el fabricante no es un valor que se pueda usar para una aplicación concreta sino que es orientativo. También se puede concluir que el rango de temperaturas para un trabajo eficiente del LED se sitúa entre 0°C y 70°C . En la figura siguiente se muestra la relación que hay entre la eficacia y la corriente de alimentación:

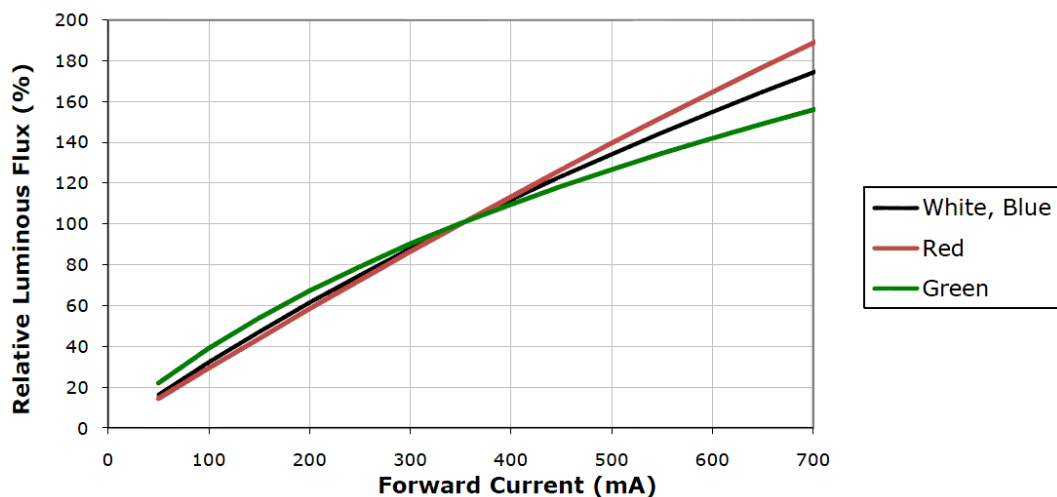


Figura 5.9.3 Flujo relativo en función de la corriente de circulación del diodo LED (datos procedentes de datasheet del modelo CREE MC-E COLOR)

Se ve que hay un valor de corriente que maximiza la eficiencia, y que a partir de ese valor el flujo luminoso sigue aumentando al incrementar la corriente, pero en menor medida. En este caso, el valor de corriente más eficiente es de 350 mA. Por tanto, la eficiencia está en hacer trabajar al LED a bajas corrientes y bajas temperaturas.

5.9.2 OPTIMIZACIÓN DE LA LUZ BLANCA. ACUERDO ENTRE EFICACIA Y REPRODUCCIÓN CROMÁTICA

Como ya se ha visto en el capítulo 2, un emisor de luz blanca para iluminación es caracterizado mediante dos figuras de mérito: la eficiencia luminosa, η_v , y el índice de reproducción cromática (CRI). La eficiencia luminosa puede ser representada como el producto de la eficiencia radiante, η_e , y la eficacia luminosa, K . Básicamente, la eficiencia radiante depende del rendimiento de la conversión de potencia del dispositivo, que mejora en cuanto la tecnología madura. La eficacia depende solamente de la distribución de carga espectral (SPD) de la luz emitida. Para una SPD dada, $S(\lambda)$, la eficacia luminosa y el índice de reproducción cromática, R_a , se obtiene mediante el método explicado en el capítulo 2.

La optimización práctica de LEDs de luz blanca envuelve dos aspectos. El primer aspecto es el mismo que para LEDs de color: conseguir la mayor eficiencia radiante posible maximizando la eficiencia cuántica interna y la eficiencia de extracción de luz. El segundo aspecto es optimizar SPD para conseguir el valor más alto posible de eficacia y CRI.

Grandes reducciones de emisión en las zonas de menor sensibilidad del ojo humano pueden aumentar la eficacia hasta los 500 lm/W. Sin embargo, esta mejora en eficacia es conseguida gracias a una considerable pérdida de reproducción cromática. En general, eficacia y reproducción cromática son incompatibles, y debe ser conseguido un acuerdo entre estas dos figuras de mérito.

5.10 TIPOS DE LEDS

Dependiendo de la aplicación, los LEDs se pueden clasificar de acuerdo a la figura 5.10.1, la cual se describe a continuación.



Fig. 5.10.1 Clasificación de los LED según su aplicación

5.10.1 Por potencia de operación

La corriente y el voltaje de polarización directa del LED determinan la potencia de operación del LED ($P = V \cdot I$), la cual está relacionada con la cantidad de flujo luminoso que emite el LED; a mayor potencia de operación el LED puede entregar mayor flujo luminoso (aunque esto no implica eficacia o eficiencia):

- *LED indicador*: Operan en un rango de 30 a 60mW de potencia eléctrica.
- *LED de potencia (HPLED o HBLED)*: Son los LED que trabajan con una potencia eléctrica mayor o igual a 1 W. Se toma como referencia el primer HPLED comercial (LUXEON, de Philips Lumileds, el cual trabaja a 1W).
- *LED de potencia media*: LED con potencia menor a 1W que pueden usarse para iluminación de áreas pequeñas.

5.10.2 Por longitud de onda

La aplicación de los LED en iluminación general, donde se requiere luz blanca, en iluminación decorativa, donde se requieren luces de color, y en aplicaciones especiales, donde se usan radiaciones no visibles, hace necesaria esta clasificación:

- *Luz monocromática*: son los LED que emiten luz con una longitud de onda dominante (azul, verde, amarillo, rojo, etc.).
- *Luz blanca*: se basan en el LED azul y la adición de un fosfato para generar luz blanca. A su vez pueden dividirse en luz blanca neutra, cálida y fría.
- *Radiación no visible*: son los LED que emiten radiación IR y UV (Figura 2.1 y Tabla 2.2).
- *LED RGBW*: son LEDs formados por 4 LEDs, rojo, azul, verde y blanco encapsulados en el mismo chip, controlados cada uno por separado. Con ellos podemos generar luz de cualquier color deseado.

5.10.3 Por tecnología de fabricación

Aunque no todas las tecnologías LED tienen un nombre específico y algunas se pueden incluir dentro de otras, son populares las siguientes:

- *LED*: LED convencional, indicador o de potencia media.
- *LED polímero (PLED, Polymer LED)*: contruidos con un polímero, su principal característica es adoptar la forma de una lamina flexible.
- *LED orgánico (OLED, Organic LED)*: contruidos a partir de un material orgánico, aunque su eficiencia es cercana a la de los HPLED, su desventaja es tener un tiempo de vida más corto.
- *Diodo láser de inyección (ILD, Injection Laser Diode)*: LED que puede emitir luz coherente (láser).

5.10.4 Por características específicas

Se pueden hacer otras clasificaciones de acuerdo a alguna característica específica del LED, como pueden ser:

- *Por forma del encapsulado*: LED cuadrado, rectangular, redondo (2, 5, 10 mm, etc.).
- *Por forma de sus terminales*: LED de montaje superficial (SMD, surface mount device); LED de montaje por perforación (through-hole).
- *Por direccionalidad de la luz*: LED estándar, LED de luz direccional, LED de luz dispersa.

CAPÍTULO 6 – SISTEMAS DE ILUMINACIÓN LEDs

Se puede definir un sistema de iluminación como el conjunto de dispositivos que se instalan para producir efectos luminosos, tanto prácticos como decorativos, con el que se pretende conseguir un nivel de iluminación o iluminancia adecuado al uso que se quiere dar al espacio iluminado. La figura 6.1.1 muestra los componentes generales de un sistema de iluminación que se describen a continuación:

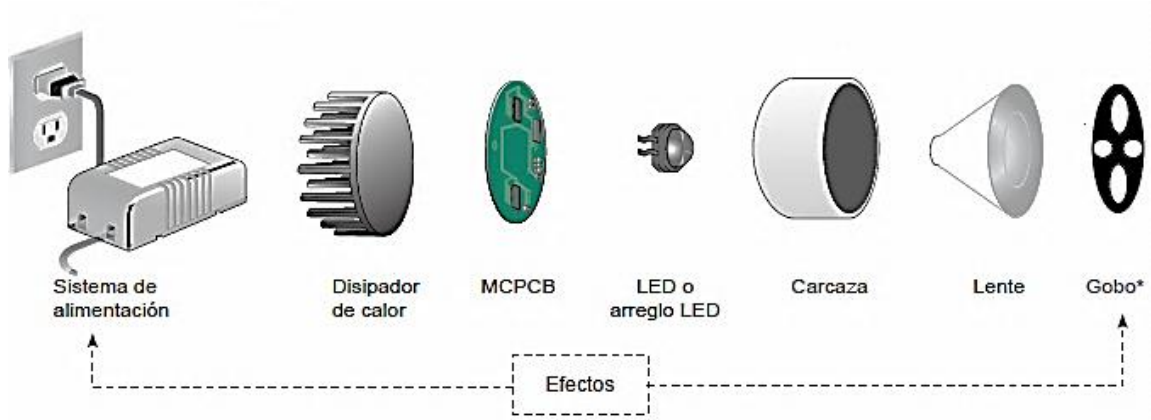


Figura 6.1.1 Composición de un sistema de iluminación basado en tecnología LED

Las luminarias se dividen en las siguientes partes:

- *Sistema de alimentación*: su finalidad es encender al LED de forma segura y eficiente.
- *Disipador de calor*: como se detalla en el capítulo 6, es una superficie metálica que al estar en contacto físico con una superficie, radia el calor hacia el ambiente de manera que el LED no sufra daños por las altas temperaturas generadas en la unión p-n.
- *Circuito impreso con núcleo metálico (MCPCB, Metal Core Printed Circuit Board)*: el MCPCB (o simplemente PCB) es un tipo especial de circuito impreso cuya función principal es transferir el calor que se genera en el o en las terminales térmicas de los LED, hacia el disipador de calor, o hacia el medio ambiente. Un PCB típico consiste de tres capas: una capa dieléctrica conductora de calor que se coloca entre dos capas metálicas. Una capa metálica es de cobre y en ella se realizan las pistas para las conexiones eléctricas. La otra capa metálica es típicamente de aluminio y su función es la de disipar el calor. En el PCB se pueden colocar uno o varios LED quedando aislados eléctricamente, por lo que pueden compartir un mismo disipador de calor.
- *LED*: es la fuente de luz del sistema de iluminación y posee dos terminales de alimentación (ánodo y cátodo), aunque en la mayoría de los casos se tiene un tercer terminal denominado terminal térmico (slug en los LED de la compañía Lumileds), que sirve para transferir el calor que se genera dentro del LED hacia el exterior. En algunos modelos de LED, el terminal slug no es eléctricamente

neutro, por lo que no se deben colocar varios LED en un solo disipador metálico.

- *Carcasa*: es el contenedor en donde se colocan todos los componentes del sistema de iluminación. En el caso de los HPLED, es común que el sistema de alimentación quede fuera de la carcasa debido a su mayor volumen y por estética del producto final. También es común que la carcasa cumpla la función de reflector; se coloca en su recubrimiento interior un material reflejante que sirve para distribuir la luz según convenga a la aplicación.
- *Lente*: es un elemento óptico que sirve para direccionar la luz. Su comportamiento óptico depende del radio, la forma del abombamiento y la estructura. Se puede colocar una lente para distribuir la luz de manera especial según sea la aplicación; por ejemplo, se pueden usar lentes para hacer el haz de luz más ancho o más estrecho.
- *Efectos*: pueden ser mecánicos y/o electrónicos. Los efectos mecánicos pueden ser tan sencillos como el globo² o tan complejos como las luminarias robóticas. Los efectos electrónicos tratan de imitar algunos de los efectos mecánicos y por lo regular son parte del sistema de alimentación. Algunos de los efectos más conocidos son: el estrobo (encendido y apagado momentáneo o sincronizado con música), la atenuación luminosa, oscurecimiento (blackout) y la mezcla de colores, entre otros. Los efectos son utilizados principalmente para la industria del entretenimiento y decoración.

Dependiendo de las características del LED empleado pueden ser opcionales el disipador de calor y el PCB. Un LED de mayor potencia necesariamente requiere de un disipador de calor para evitar daños por incremento de temperatura, mientras que un MCPCB se usa principalmente para fijar el LED al disipador cuando éste es de tamaño reducido. De igual forma, es opcional el uso de una lente y de efectos de luz; depende del tipo de aplicación al que esté destinado el sistema de iluminación.

A continuación se describirá el sistema de alimentación, control y disipación del calor de las que consta una luminaria LED.

6.1 SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN Y CONTROL: DRIVERS

Como se ha visto en el capítulo anterior, el diodo LED emite luz cuando está polarizado directamente con una tensión continua, y es alimentado con una corriente constante:

² Superficie o mascara perforada con un patrón, que al ser colocada frente a la fuente de luz, y con ayuda de elementos ópticos, proyecta figuras u otro efecto luminoso.

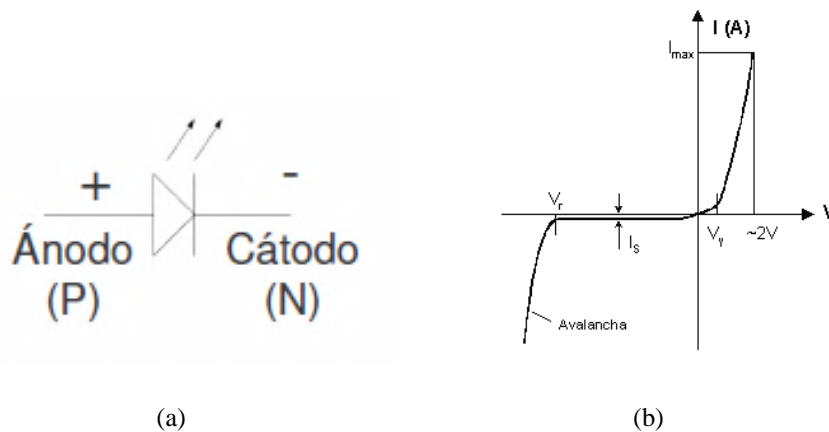


Figura 6.1.2 a) Símbolo eléctrico del LED; b) Curva característica I-V

Cada LED tiene especificada una corriente de trabajo óptima en la que se obtiene el mayor flujo luminoso sin dañar el dispositivo. Sin embargo, la red eléctrica a la que conectamos es de tensión alterna. Por tanto, hay que acondicionar la energía eléctrica aportada por la red antes de alimentar el diodo. Esta es la función que realizan los sistemas de alimentación, o drivers: conducir y controlar el movimiento de los electrones de la fuente de energía hasta el diodo LED. La fuente de energía generalmente es la red eléctrica, aunque también puede ser baterías en aplicaciones del automóvil, o un sistema de almacenamiento aislado en una vivienda con una localización sin acceso a la red.

Según su principio de funcionamiento, las fuentes de alimentación o drivers se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Resistencia limitadora
- Fuente de tensión lineal
- Fuente de tensión conmutada
- Fuente de corriente constante

En electrónica, una fuente de alimentación es un dispositivo que convierte la tensión alterna de la red de suministro, en una o varias tensiones, prácticamente continuas, que alimentan los distintos circuitos del aparato electrónico al que se conecta (ordenador, televisor, impresora, router, etc.). Los tres tipos tienen en común una etapa de rectificación para convertir la tensión alterna en tensión continua (figura 6.1.3):

Los convertidores ACDC se basan en estructuras puente (ej. Posible montaje monofásico)

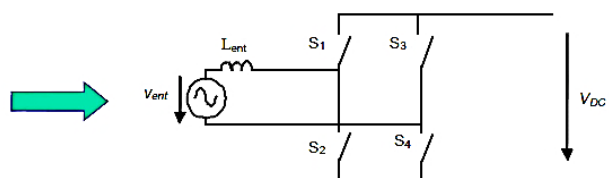


Fig. 6.1.3 Esquema básico de un rectificador

La fuente de alterna, típicamente la red eléctrica o un generador en sistemas aislados, presenta una impedancia serie de tipo inductivo L_{ent} , lo que conduce a pensar que se comportará como fuente de corriente. Por tanto, un condensador en el lado de continua proporcionaría una conexión coherente. Esta hipótesis se basa en la premisa de que a la frecuencia de conmutación de los interruptores la impedancia ofrecida por la inductancia de la red es “suficientemente” elevada. En el caso de los convertidores AC/DC dicha hipótesis no es siempre cierta, aunque sí lo es en las aplicaciones de alimentación de LEDs.

1. RESISTENCIA LIMITADORA

Se trata simplemente de una etapa rectificadora con un puente en H, un condensador que actúa como filtro, estabilizando la tensión de la rama de LEDs, y una resistencia en serie con los LEDs (figura 6.1.4). Esta resistencia puede ser un potenciómetro que permita regular el valor de la corriente de la rama y, de este modo, el flujo luminoso de los LEDs:

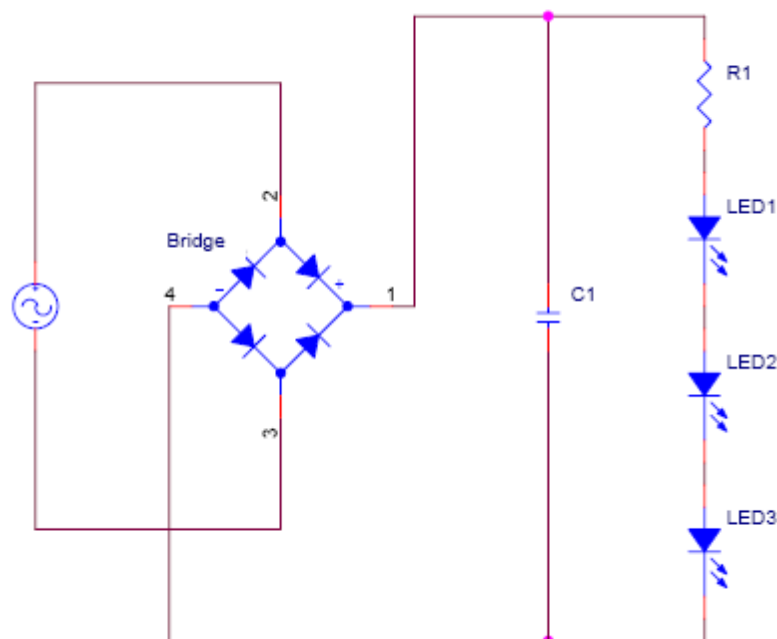


Figura 6.1.4 Esquema eléctrico del sistema de alimentación mediante resistencia limitadora

Sus ventajas son el bajo coste de sus componentes y la simplicidad del circuito. Sin embargo, el sistema presenta baja eficiencia y una regulación de corriente muy pobre (una variación del 10% de tensión de red implica una variación de la corriente de los LEDs del 25% o superior).

2. FUENTE DE TENSIÓN LINEAL

Del mismo modo que la alimentación con resistencia limitadora, consta de una primera etapa de rectificación y filtrado. La regulación, o estabilización de la tensión a un valor establecido, se consigue con un componente denominado regulador de tensión, que es un sistema de control en lazo cerrado que, en base a la salida del circuito, ajusta el elemento regulador de tensión que en su gran mayoría este elemento es un transistor. Este transistor está siempre polarizado, actuando como resistencia regulable dependiendo de la tipología de la fuente, mientras el circuito de control juega con la región activa del transistor para simular mayor o menor resistencia y, por consecuencia, regulando el voltaje de salida (figura 6.1.5).

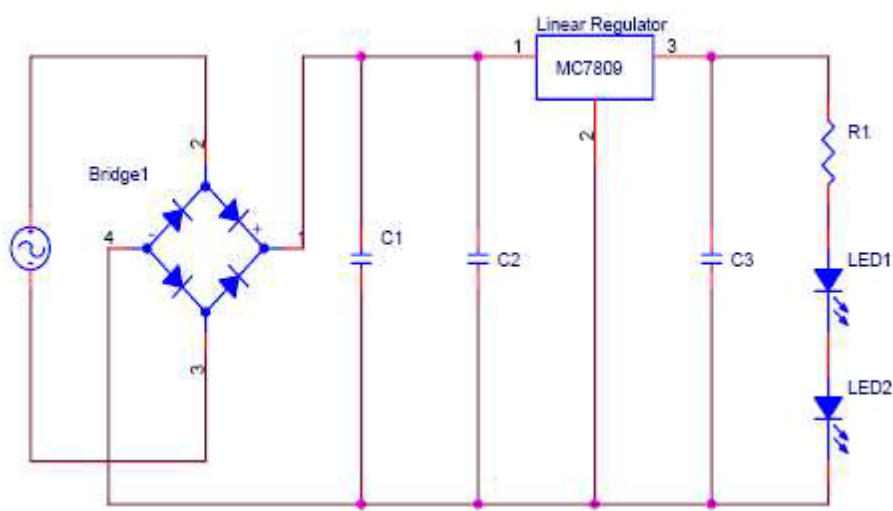


Figura 6.1.5 Esquema eléctrico del sistema de una fuente de alimentación lineal

A la salida de esta etapa se encuentra una segunda etapa de filtrado a fin de conseguir una mayor estabilidad en el rizado (aunque no obligatoriamente, todo depende de los requerimientos del diseño), que puede ser simplemente un condensador.

Este tipo de fuente sigue manteniendo las ventajas de la alimentación mediante resistencia limitadora, simplicidad y bajo coste, y mejora la regulación de corriente. Sin embargo, sigue siendo poco eficiente en la utilización de la potencia suministrada dado que parte de la energía se transforma en calor por efecto Joule en el elemento regulador (transistor), ya que se comporta como una resistencia variable.

3. FUENTE DE TENSIÓN CONMUTADA

La fuente conmutada transforma energía eléctrica mediante transistores en conmutación en vez de utilizar transistores polarizados en su región activa. Las fuentes conmutadas utilizan transistores conmutándolos activamente a altas frecuencias (20-100 kHz) entre corte (abiertos) y saturación (cerrados). La forma de onda cuadrada resultante es aplicada a transformadores con núcleo de ferrita (Los núcleos de hierro no son adecuados para estas altas frecuencias porque tienen pocas pérdidas debido a corrientes de Foucault y alta densidad de flujo) para obtener uno o varios voltajes de salida de corriente alterna (CA) que luego son rectificadas con IGBTs y filtrados para obtener

los voltajes de salida de corriente continua (CC). Las ventajas de este método incluyen menor tamaño y peso del núcleo, menor calentamiento y, por lo tanto, mayor eficiencia. Las desventajas comparándolas con fuentes lineales es que son más caras y más complejas, como puede verse en la figura 6.1.6, y generan ruido eléctrico de alta frecuencia que debe ser cuidadosamente minimizado para no causar interferencias a equipos próximos a estas fuentes.

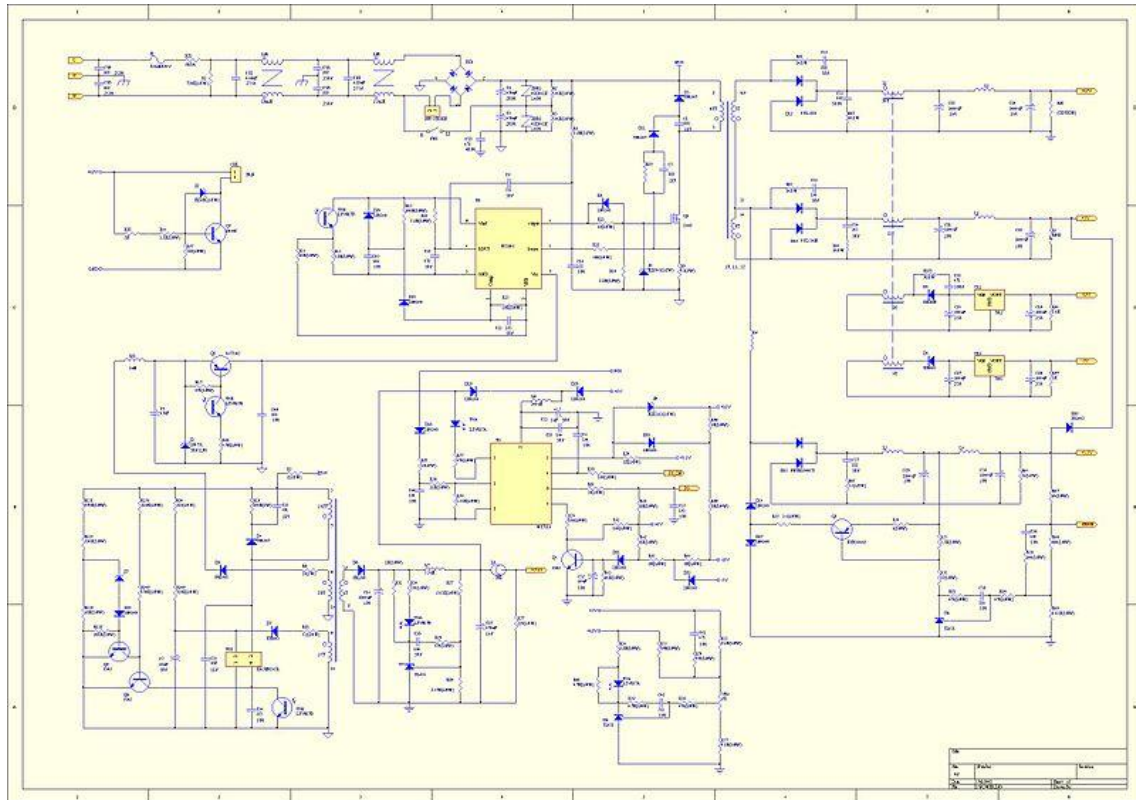


Figura 6.1.6 Esquema eléctrico de una fuente de alimentación conmutada de un ordenador

Las fuentes de corriente garantizan unas óptimas prestaciones para el control de los sistemas basados en LEDs de potencia:

- Corriente constante frente a variaciones de la tensión de alimentación.
- Estabilidad parámetros del LED – flujo, potencia, temperatura, etc.
- Incremento de la expectativa de vida de los LEDs.
- Incremento de la eficacia sistema - Menores pérdidas y calentamientos.
- Posibilidad de regulación de flujo o dimming.
- Factor de potencia elevado – PF 0,95 o superior.
- Protección frente a defectos de secundario y/o temperaturas de funcionamiento anormales.
- Vida útil de 50.000 horas, si el driver trabaja dentro de su rango nominal.

Los sistemas de alimentación, o drivers, deben cumplir con las directivas correspondientes, destacando:

- Directiva de Baja Tensión 2006/95/CEE
 - Seguridad Eléctrica:
 - EN 61347-2-13 → Requisitos para dispositivos de control electrónicos alimentados con corriente continua o corriente alterna para módulos LED.
 - Funcionamiento:
 - EN 60927 → Aparatos auxiliares para lámparas. Aparatos arrancadores (excepto cebadores de efluvios). Requisitos de funcionamiento.
 - EN 60929 → Balastos electrónicos alimentados en corriente alterna para lámparas fluorescentes tubulares. Requisitos de funcionamiento.
- Directiva de Compatibilidad Electromagnética 2004/108/CEE
 - RFI: EN 55015 → Límites y métodos de medida de las características relativas a la perturbación radioeléctrica de los equipos de iluminación.
 - Armónicos: EN 61000-3-2 → Compatibilidad electromagnética. Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica.
 - EMC EN 61547 → Equipos para alumbrado de uso general. Requisitos de inmunidad.

6.2 SISTEMAS DE CONTROL PARA LED

Los LEDs tienen una curva característica exponencial que muestra grandes variaciones de corriente ante pequeñas variaciones de tensión. Aproximadamente, la tensión directa del led es $V_f = E_g/q$, donde E_g es el ancho de banda del semiconductor y q es la carga elemental. Por ejemplo, V_f es aproximadamente 1.9V para el rojo, 2.1V para el amarillo, 3.0V para el verde y 4.0V el azul.

Para realizar la mezcla aditiva de fuentes de luz basta con dirigir el haz de luz de las fuentes de color primario en la misma dirección. Variar la intensidad luminosa de cada fuente de luz primaria revela la gama de color posible generada por las fuentes primarias de color.

Se conoce como atenuador de luz (dimmer) al dispositivo que regula continuamente la intensidad luminosa de una fuente de luz. Los atenuadores de luz tienen dos propósitos: ahorro de energía y efectos estéticos de luz.

Dependiendo del tipo de lámpara que se emplee se aplica una técnica de atenuación distinta. El control de fase ascendente se utiliza con lámparas incandescentes. Las lámparas halógenas de bajo voltaje con transformador electrónico se regulan mediante el control de fase descendente. Los proyectores térmicos, como las lámparas halógenas incandescentes, se pueden regular sin problema alguno. Las lámparas fluorescentes

requieren de equipos auxiliares especiales para la regulación. Para la regulación de lámparas fluorescentes compactas se necesitan reactancias electrónicas especiales y la mayoría de las convencionales no admiten la regulación.

En el caso de los LED, la capacidad de atenuación de la intensidad luminosa es una de sus grandes ventajas. Para ello se utiliza un circuito externo que debe considerar algunas de las características eléctricas del LED y emplear una técnica de atenuación adecuada. El hecho de que haya disponibles LED de colores rojo, verde y azul hace posible mezclas para generar luz blanca o de otros colores con el modelo RGB.

Las características del color que emite un LED son dependientes de la corriente de polarización directa. Por lo tanto, si se quiere hacer la atenuación de la intensidad luminosa se debe elegir una técnica que no produzca un corrimiento de color. Para esto, se debe utilizar un nivel de corriente de constante. El color emitido no sufre ningún corrimiento mientras el estado de encendido del LED tenga la corriente de trabajo definida.

Una vez establecido el control para tener una corriente constante en el LED, se puede implementar una técnica para la atenuación de la intensidad luminosa. Las técnicas que se usan en LED son las que lo encienden totalmente en un intervalo de tiempo t_{on} , y lo apagan totalmente en un tiempo t_{off} . Este proceso se repite periódicamente a una velocidad relativamente alta para que el ojo humano no lo note y se tenga la impresión de atenuación de luz. Como resultado se tienen señales de tipo cuadrada con un ancho de pulso que varía según la técnica de atenuación utilizada.

6.2.1 MODULACIÓN EN FRECUENCIA (FM, FREQUENCY MODULATION)

En esta técnica se usa el concepto de un pulso de duración fija t_{on} con frecuencia variable. El nivel de atenuación es proporcional al número de pulsos en un intervalo de tiempo (figura 6.2.1):

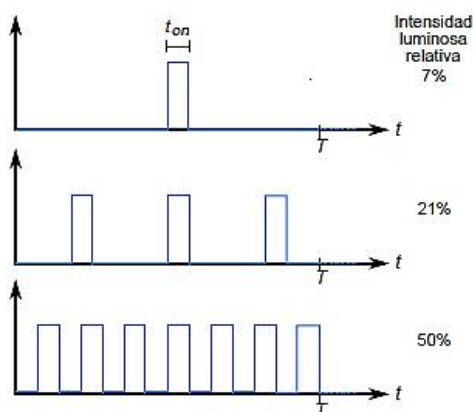


Figura 6.2.1 Modulación en frecuencia (FM)

6.2.2 PWM

Es la técnica preferida para el control de la intensidad luminosa de los HPLED. En ella se usa una señal frecuencia fija con pulso periódico. El ancho del pulso es variado entre cero y el máximo valor posible (periodo de la señal, T). La razón entre el tiempo de duración del pulso (t_{on}) y la máxima duración posible del pulso (ciclo de trabajo) define la intensidad luminosa del LED (figura 6.2.2).

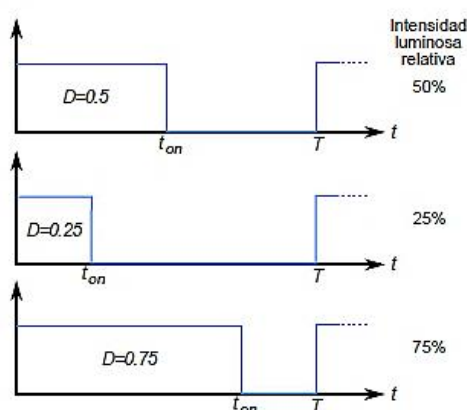


Figura 6.2.2 Modulación por ancho de pulso PWM

6.2.3 MODULACIÓN POR ÁNGULO DE BIT (BAM, BIT ANGLE MODULATION)

En esta técnica se utiliza un tren de pulsos con tamaño de 8 bits (palabra binaria) que contiene el valor de intensidad luminosa. Un pulso del tren representa a un bit de la palabra; la duración del pulso depende del peso o significancia del bit que representa. Los bits más significativos tienen una duración más larga y viceversa. Por ejemplo, si el bit 0 (menos significativo) tiene una duración de 1 ms, entonces el bit 1 tiene una duración de 2 ms, los bits siguientes tendrían una duración de 4, 8, 16, 32, 64 y 128 ms respectivamente (figura 6.2.3). Si se implementa con código, esta técnica reduce en 800% el tiempo de procesamiento, comparado con el PWM.

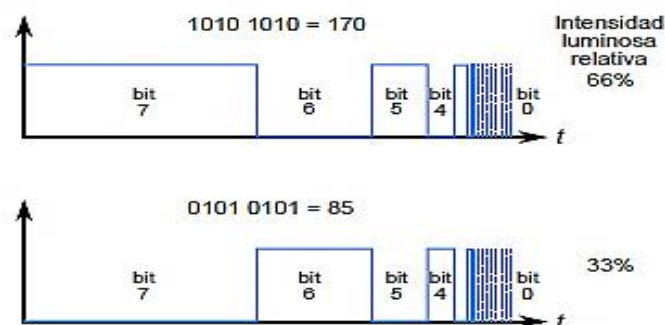


Figura 6.2.3 Modulación por ángulo de bit.

6.2.4 PROTOCOLOS DE CONTROL LED

Está claro que los sistemas de control entrarán en una nueva era de sofisticación que permitirá a los diseñadores crear sistemas inteligentes de iluminación tan sofisticados que sean capaces de autogestionar su uso, aprender los hábitos de los usuarios, e incluso programar el espectro de luz óptimo para la edad de los usuarios para leer o ver la televisión. A continuación se revisan los estándares de comunicación en iluminación más comunes en la actualidad, con las ventajas y desventajas de cada uno.

6.2.4.1 CONTROL ANALÓGICO POR TENSIÓN 0-10V

El protocolo de control de iluminación 0-10V se determina por la norma internacional ANSI E1.3 - 2001 y es una de las más simples de control de iluminación. Se utiliza un voltaje de entrada analógico para controlar la intensidad de una fuente de luz con una tensión de DC que varía entre cero y 10 voltios. Se escala su producción en consecuencia, de forma que en el más alto voltaje la luz debe ser del 100% de su producción potencial, a 5V, debe ser el 50% de la salida, y al 0V debe ser de 0%.

La ventaja de esta técnica de control es que es simple de implementar utilizando un cable de señal de control externa y un hilo común de retorno. La corriente utilizada para proporcionar la señal de voltaje es relativamente baja (típicamente de 1 a 4 mA), por lo que se puede ejecutar a lo largo de cables relativamente delgadas con poca caída de tensión. La desventaja del protocolo 0-10V es que en instalaciones de iluminación más sofisticadas puede haber cientos de accesorios de iluminación conectados en red que requerirían varios cientos de hilos de control, complicando los diagnósticos de problemas y aumentando los costes de instalación.

6.2.4.2 DIGITAL MULTIPLEX (DMX-512A)

DMX512 es un estándar para redes de comunicaciones digitales que se utilizan comúnmente para controlar aparatos de iluminación LED y otros dispositivos. El protocolo DMX512 se basa en la utilización de "canales" para transmitir órdenes de control a los aparatos que lo soporten. El protocolo DMX512 tiene un límite de 512 canales, y cada canal se puede regular desde el valor 0 hasta el valor 255 (valores DMX o DMX values). Algunas consolas para iluminación profesional pueden tener hasta 8 salidas DMX físicas, lo que permite controlar 4096 dispositivos conectados a la misma consola. Con la tecnología Ethernet (Por ejemplo: Art-Net) éstos pueden ser ampliados aún más.

Al avanzar la tecnología, las funciones en los aparatos cada vez se incrementan más, y los canales DMX necesarios para controlarlos también. Mientras un Parcan se basta con un canal DMX, una cabeza móvil de última generación puede llegar a utilizar más de 40 canales DMX. Es por ello que el límite de 512 canales DMX, que al principio podía parecer más que suficiente, está ya llegando a su límite y la necesidad de adoptar un

nuevo protocolo es cada vez mayor. En estos momentos la organización ESTA (The Entertainment Services & Technology Association) está desarrollando un nuevo protocolo llamado ACN (Architecture for Control Networks) para este propósito.

Aunque antiguamente la utilización de cables DMX de 3 pines del tipo XLR era común, hoy en día el cable de 5 pines del tipo XLR es el estándar dentro de la industria de efectos especiales. La configuración de los pines 1 al 3 en un cable de 3 pines es la misma a la de los pines 1 al 3 en un cable de 5 pines, como se verá a continuación. Un conector de 5 pines (XLR-5) está configurado de la siguiente forma:

- Pin 1 = señal de referencia = revestimiento del cable (malla o masa);
- Pin 2 = señal invertida = "-" polo negativo;
- Pin 3 = señal = "+" polo positivo;
- Pin 4 = opcional (la utilización de este pin varía de acuerdo con el aparato en operación y los fabricantes nunca llegaron a un acuerdo sobre cómo utilizarlo. En origen era para tener feedback de los aparatos y que fuera bidireccional);
- Pin 5 = opcional (la utilización de este pin varía de acuerdo con el aparato en operación y los fabricantes nunca llegaron a un acuerdo sobre cómo utilizarlo. En origen era para tener feedback de los aparatos y que fuera bidireccional).

Si bien es cierto que en la industria del entretenimiento el cable del tipo XLR-5 es el cable estándar, para aplicaciones arquitecturales por motivos prácticos y estéticos la utilización de cables de red (categoría 5 o mayor) con conectores RJ-45 también es muy común y tiene la capacidad de transmitir la señal DMX con mucha estabilidad.

Si tenemos 3 aparatos en nuestro enlace que utilizan cada uno 5 canales DMX, entonces la dirección DMX del primer aparato puede ser configurada en 1 (1 al 5), la del segundo en 6 (6 al 10) y la del tercero en 11 (11 al 15). Obviamente que ésta no es la única forma de configurar las direcciones DMX, ya que bien puede el segundo aparato configurarse en 21 (21 al 25) y el tercero en 31 (31 al 35). Hay que tener en cuenta es que las direcciones DMX de los aparatos nunca deben estar entrecruzadas ya que esto originaría una respuesta inesperada de los mismos. A continuación se muestra una red típica de control de tres puertos DMX conteniendo una serie de accesorios de iluminación LED cada una:

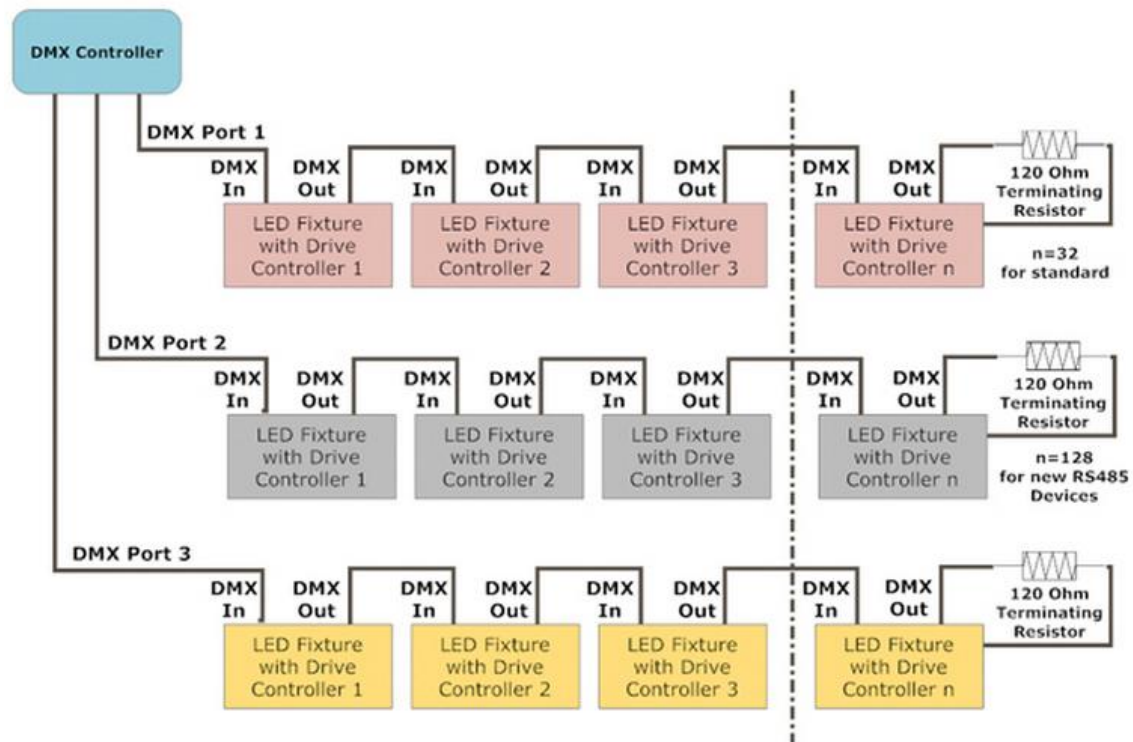


Figura 6.2.4 Red de control de tres puertos DMX

En cada controlador DMX, existe un "patch" (territorio - de trabajo en este caso), en el cual todos los aparatos del enlace están debidamente configurados con sus respectivas direcciones DMX. El "patch" y la configuración de las direcciones DMX en cada aparato son independientes, por lo que es necesario verificar que el contenido de ambos sea siempre el mismo.

6.2.4.3 REMOTE DEVICE MANAGEMENT (RDM)

El protocolo de gestión remota de dispositivos, o RDM, es una mejora del protocolo DMX512, que permite la comunicación bidireccional entre un controlador de iluminación y los dispositivos conectados compatibles con RDM en un estándar de línea DMX. Este protocolo permitirá el seguimiento de configuración, estado, y el manejo de estos dispositivos, de tal forma que no perturbe el funcionamiento normal de los dispositivos estándar DMX512 que no reconocen el protocolo RDM.

El estándar RDM utiliza el tiempo entre paquetes para transmitir datos a dispositivos compatibles. Por lo tanto, no añaden ningún dato que los dispositivos estándar DMX considerarían información válida. Todos los dispositivos RDM en el enlace tendrán un identificador único (UID) que consistirá en una identificación del fabricante y el número de serie. El dispositivo de control puede utilizar un procedimiento de "descubrimiento" para adquirir los UIDs de todos los dispositivos conectados y luego poder comunicarse automáticamente a un dispositivo específico o en grupos identificados por el fabricante.

El protocolo RDM ofrece los siguientes beneficios:

- Capacidad de la consola de configurar la dirección base del aparato. Esto permite una instalación rápida y sin necesidad de instaladores para establecer las direcciones DMX de forma manual.
- Los dispositivos RDM pueden actualizar el firmware a través del cable RS485.
- Al permitir la comunicación bidireccional es mucho más fácil de mezclar con sofisticadas instalaciones DMX o protocolos de Ethernet, tales como ACN.
- Es posible el control de las unidades individualmente (direccionamiento individual), por grupos (grupo de direccionamiento) o de todas las unidades.
- No hay interferencia en la comunicación por la estructura simple de datos.
- Control de los mensajes de estado del dispositivo (lámpara falla, etc.)
- Búsqueda automática de dispositivos de control
- Fácil creación de grupos de luminarias.
- Atenuación automática de todas las unidades a la hora de seleccionar una escena.
- Sistema con inteligencia asignada. Cada unidad contiene, entre otras cosas, los siguientes datos: dirección de personal, asignación de grupo, los valores de iluminación de la escena, el tiempo de desvanecimiento, etc.
- Pueden ser almacenados como valores por defecto tolerancias operacionales de LEDs (por ejemplo, se pueden ajustar para el ahorro de energía valores máximos).
- Fading: Ajuste de atenuación de velocidad.
- Identificación del tipo de unidad.

El protocolo RDM permite al controlador obtener información, por ejemplo si el LED tiene sobrecalentamiento, funcionamiento, el consumo de corriente, voltaje DC o toma de corriente, y en el caso de aparatos de iluminación avanzados, llevar a cabo mediciones de temperatura de color y CRI.

Hay varias razones de porqué RDM no se ha convertido en omnipresente en toda la industria de la iluminación:

- La electrónica necesaria para implementar RDM añadía costes a los sistemas de RDM.
- Hubo una falta de controladores RDM que en realidad podían aprovechar la potencia extra que ofrecen los dispositivos de quejas RDM. El número de controladores limitados significaba que sus precios fueron significativamente más altos que el estándar de controladores DMX.
- Las ventajas RDM no eran conocidas por la comunidad de diseñadores de iluminación, y sólo se utiliza DMX.
- No había muchos drivers LED que eran compatibles con RDM, por lo que la elección de los fabricantes era limitada.

Muchos de los inconvenientes descritos anteriormente han sido abordados:

- ✓ Los microprocesadores utilizados en los controladores DMX se han vuelto tan poderosos que incluyen automáticamente EEPROM. Es poco costo adicional aplicar RDM.
- ✓ Las compañías de semiconductores han implementado soluciones aisladas Transceiver RS485 que permite implementar RDM a un precio competitivo.
- ✓ Las principales empresas del controlador DMX como ENTEC, Artistic Licence y Jese, ahora ofrecen controladores RDM que permiten a los diseñadores tener un control total y una fácil implementación de las instalaciones.
- ✓ En la actualidad hay una amplia gama de sistemas de iluminación RDM compatibles disponibles, tales como Enfis, IST y EldoLED entre otros.

6.2.4.4 DIGITAL ADDRESABLE LIGHTING INTERFACE (DALI)

DALI se estableció como un sucesor para el control de voltaje analógico (1-10V). El protocolo es un estándar abierto definido por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) 60929, estándar para los balastos de lámparas fluorescentes. A finales de 2009, el estándar DALI fue revisado para incluir las funciones ampliadas de comandos para una variedad de dispositivos, incluyendo la Parte 207 para módulos de LED en IEC 62386.

El protocolo de comunicación DALI está diseñado para operar en un cable de dos hilos. La gama incluye una serie de controladores, unidades de luces de interfaz y módulos especiales diseñados, convertidores y otros productos para asegurar la máxima versatilidad del sistema, con una variedad de fabricantes incluyendo Osram, Philips, Helvar y Atco Tridonic. Mediante el uso de un intercambio bidireccional de datos, un controlador DALI puede consultar y establecer el estado de cada unidad de iluminación dentro de una red DALI como se muestra en la figura 6.2.5:

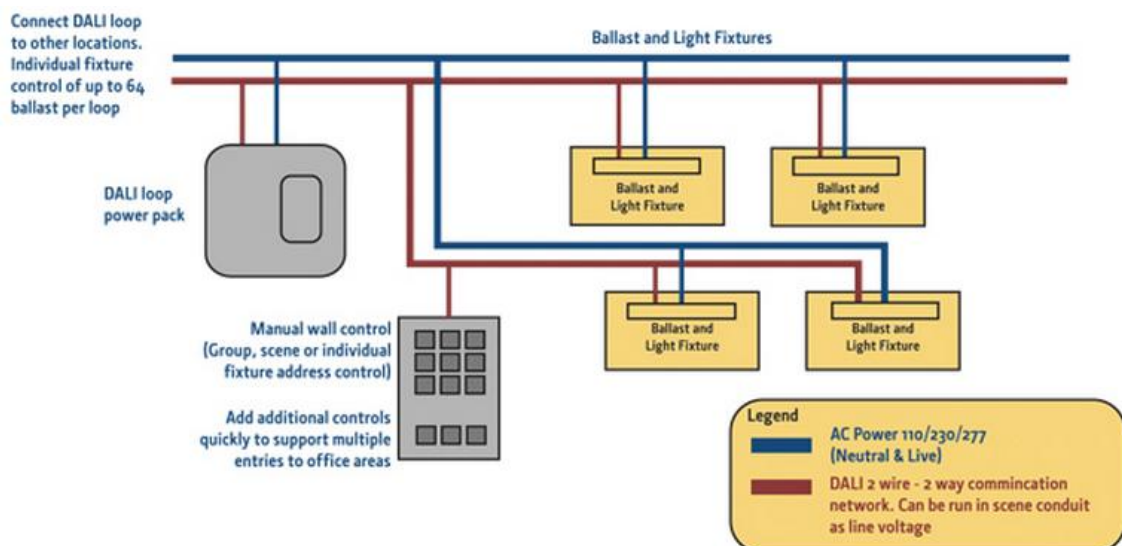


Figura 6.2.5 Red DALI

Una red DALI consiste en un controlador y uno o más dispositivos de iluminación (por ejemplo, balastos eléctricos y reguladores) que tienen interfaces DALI. El controlador puede monitorizar y controlar cada luz por medio de un intercambio de datos bidireccional. El protocolo DALI permite a los dispositivos ser direccionados de forma individual y también incorpora los mensajes de difusión “Grupo Escena” para varios dispositivos simultáneamente (por ejemplo, "Grupo 1 GOTO 100%" o "Recall Scene 1").

Cada dispositivo de iluminación se le asigna una dirección estática única en el rango numérico de 0 a 63, haciendo posible un máximo de 64 dispositivos en un sistema autónomo. Alternativamente, DALI se puede utilizar como un subsistema a través de pasarelas DALI para tratar más de 64 dispositivos. Los datos se transfieren entre el controlador y los dispositivos por medio de una máquina asíncrona, semidúplex, el protocolo de comunicación en serie en un bus diferencial de dos hilos, con una tasa de transferencia de datos fija de 1200 bit / s.

DALI requiere un solo par de hilos para formar el bus para la comunicación a todos los dispositivos en una única red DALI. La red puede estar dispuesta en un bus o topología en estrella, o una combinación de éstos. El sistema DALI no está clasificado como SELV (separados por muy baja tensión) y por lo tanto se puede ejecutar junto a los cables de red o en un cable multi-núcleo que incluye la red eléctrica. Los datos DALI se transmiten utilizando la codificación Manchester y tiene una elevada relación señal a ruido que permite una comunicación fiable en presencia de una gran cantidad de ruido eléctrico. DALI emplea un puente de diodos en el circuito de interfaz de manera que los dispositivos pueden ser conectados sin tener en cuenta la polaridad. El nivel de señal se define como $0 \pm 4,5$ V para el "0" y $16 \pm 6,5$ V para el "1". Potencia de interfaz central máxima es de 250 mA y 2mA por unidad. El cable de red debe tener aislamiento de 600V y por lo menos un 1 mm de sección, con una altura de caída de 2 voltios a lo largo del cable (máx. 300 m). La interfaz de señal está separada galvánicamente y no necesita resistencias de terminación.

Las primeras generaciones de dispositivos DALI almacenaban los datos de configuración en la EEPROM, lo que fue un problema debido al número limitado de ciclos de escritura soportados por EEPROMs. En la generación actual de dispositivos DALI, la memoria RAM se utiliza de preferencia en la EEPROM durante el funcionamiento normal, lo que reduce significativamente el número de EEPROM escribe y se extiende así su vida.

Las ventajas de los sistemas DALI incluyen:

- Un solo bus puede controlar hasta 64 dispositivos.
- Los balastos y controles conectados al mismo bus DALI se pueden asignar a un máximo de 16 grupos de capas (o zonas) de los controles y escenas en el mismo espacio.

- Un solo par de hilos de control, que forman el bus, conecta los balastos y controles directamente, lo que simplifica el cableado en espacios con zonas de control múltiple. El bus está también aislado de cada balastro y control.
- Atenuación no lineal de hasta 0,1% (en teoría).

Aunque DALI ha estado en el mercado desde hace bastante tiempo, no ha sido ampliamente adoptado debido al coste atribuido a un dispositivo de iluminación controlado mediante DALI en comparación con otros. La cuestión de los costes, al igual que con el protocolo RDM, está siendo mitigada por la disponibilidad de microprocesadores y los controladores basados en DALI de bajo costo, por lo que la demanda de este protocolo está volviendo a ser fuerte para nuevos proyectos.

El diseñador de iluminación debe tener en cuenta que no todos los drivers DALI para LED son iguales, y se debe tener cuidado para determinar la especificación correcta de cada uno. Por ejemplo, será importante verificar el rango de regulación mínimo del controlador, y también qué instrucciones DALI se ejecutan en el controlador. Hay varios drivers low cost DALI que no implementan todos los comandos DALI, y pueden causar problemas cuando se instala con otros tipos de equipos DALI. Siempre se debe preguntar al proveedor el conjunto de instrucciones DALI que se implementa con el controlador que desee utilizar (este consejo también va para el protocolo RDM).

6.2.4.5 CONTROL POR REDES IP

Hoy en día Internet utiliza los protocolos IP con su núcleo de la capa de comunicaciones para transferir información entre un dispositivo y otro. Sin embargo, ya está empezando a atraer la atención de la iluminación como una red para la comunicación con dispositivos de iluminación y control de dispositivos más complejos.

Las ventajas del uso de TCP / IP son:

- Una infraestructura de bajo costo prefabricada con las máximas posibilidades.
- Escalabilidad - Cerca de redes de alumbrado ilimitadas son posibles
- Compatible con los protocolos de red e Internet, fácil de controlar redes de alumbrado remotamente.
- Las redes pueden configurarse fácilmente
- La velocidad de control del protocolo es muy alta (ahora GigaByte ethernet)
- La tolerancia a fallos - El sistema debe ser tolerante a fallos si los paquetes de información se pierden.

6.2.4.6 KNX – EDIFICIOS INTELIGENTES

KNX es un estándar (EN 50090, ISO / IEC 14543), red basada en el protocolo OSI de comunicaciones para edificios inteligentes. KNX es el sucesor y la convergencia de las tres normas anteriores: la European Home Systems Protocol (EHS), BatiBUS, y la European Installation Bus (EIB Instabus o).

6.2.5 SEGURIDAD EN EL PARPADEO O FLICKER

La frecuencia típica para atenuación de la intensidad luminosa en los LED es de 100 Hz a más de 5 kHz en señales aún menores a 100 Hz es posible ver el efecto de parpadeo y frecuencias de atenuación menores o iguales a 50 Hz han demostrado tener efectos perjudiciales en la salud humana como vista cansada y dolores de cabeza.

El uso de la iluminación artificial siempre ha generado controversia acerca de si la luz emitida es saludable y si esa luz es segura para los seres humanos. Por ejemplo, existen advertencias de la Agencia de Protección de la Salud con respecto a las lámparas fluorescentes compactas y la exposición excesiva a la luz ultravioleta. Otro ejemplo son los temores planteados por la *Agencia Francesa para la Seguridad Alimentaria*, del Medio Ambiente y Ocupacional (ANSES), estudio que algunas luces LED crean una luz azul peligrosa. Los síntomas que se ven agravados por el uso de luz artificial son:

- Xeroderma pigmentosa
- Lupus
- Migraña
- Epilepsia
- Encefalomielitis miálgica (conocida como el síndrome de fatiga crónica)
- Síndrome de Meares-Irlen (también conocida como síndrome escotópica)
- Fibromialgia
- Electrosensibilidad
- Dispraxia
- Autismo / síndrome de Asperger
- Enfermedades de la retina, como la degeneración macular relacionada con la edad
- Dermatitis actínica crónica
- Urticaria solar

La luz visible se define como la radiación electromagnética con longitudes de onda entre 380 nm y 750 nm, que son en su mayoría detectadas por el ojo humano. Además de la longitud de onda, la luz también se puede caracterizar cuantitativamente por su intensidad, como puede verse en la figura 6.2.6:

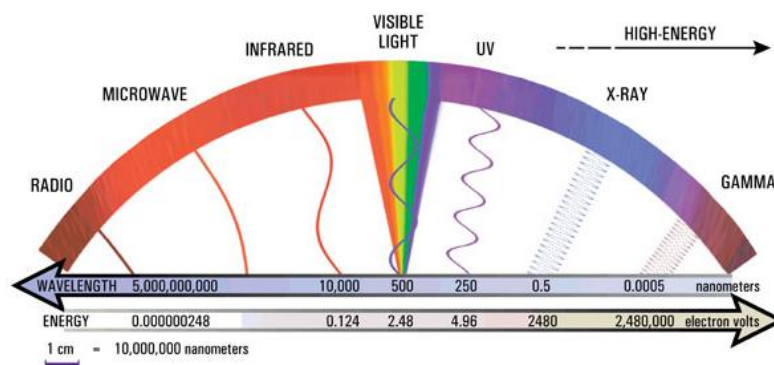


Figura 6.2.6 El espectro de color

La porción ultravioleta del espectro puede ser particularmente peligrosa para los seres humanos. Dependiendo de las características del sistema de emisión de luz, el espectro emitido puede ser amplio o puede tener afilados "picos" en ciertas longitudes de onda. El primero es el caso de la luz solar natural y el último es para lámparas incandescentes, halógenas y ciertos tipos de lámparas LED. Las radiaciones ultravioletas de la luz solar son atenuadas en el paso por la atmósfera.

Hay límites de exposición (200-3000 nm) reconocidos internacionalmente a la radiación emitida por las lámparas y luminarias que se establecen para proteger contra los peligros fotobiológicos (International Electrotechnical Commission 2006). Estos límites también incluyen la radiación de las lámparas fluorescentes compactas.

La difusión y la comprensión de los efectos de parpadeo de las fuentes de luz artificial están poco estudiados. Sin embargo está claro que existen algunos beneficios para la industria de la iluminación para tomar más en cuenta sobre todo con la oportunidad que le brinda a través de las nuevas tecnologías de LED y OLED. En la figura 6.2.7 se muestran los aspectos del parpadeo de la luz de salida:

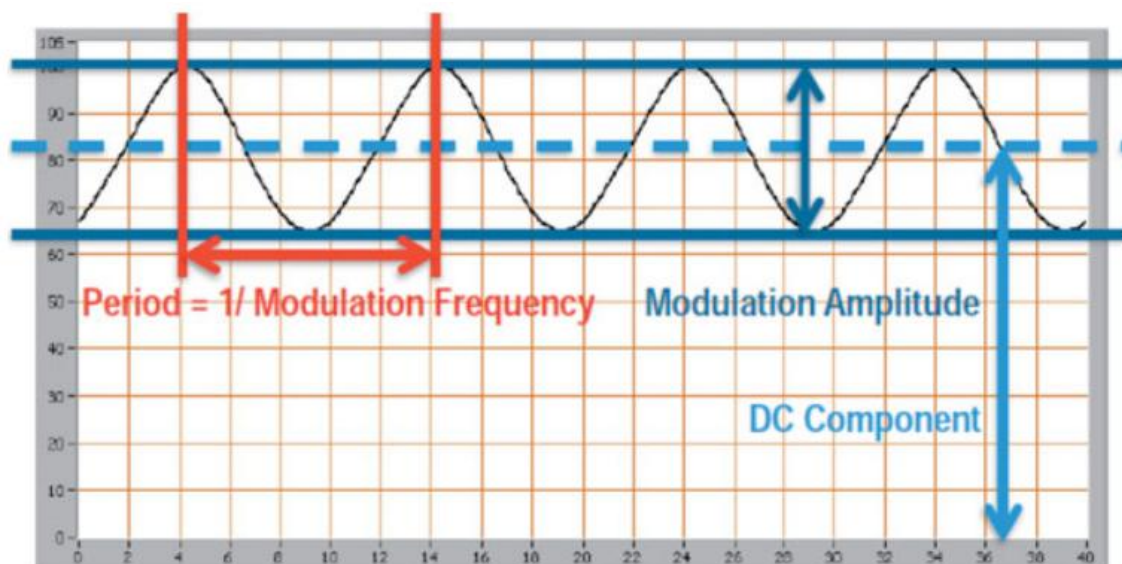


Figura 6.2.7 Parámetros para la definición del parpadeo de una fuente de luz

- Frecuencia Modulada: ciclos de una señal periódica por unidad de tiempo
- Amplitud de modulación pico a pico: variación de la magnitud de una señal periódica, a veces se hace referencia al valor medio de la señal.
- Componente DC, Valor DC, DC Offset, Offset: el valor medio de una señal periódica
- Flicker: modulación de la fuente de luz; no está asociado con ninguna señal de medición periódica

Desafortunadamente, la mayoría de los controladores LED que se utilizan hoy en día tienen características de parpadeo muy pobres. Una onda de corriente constante típica de un controlador actual puede verse en la figura 6.2.8:

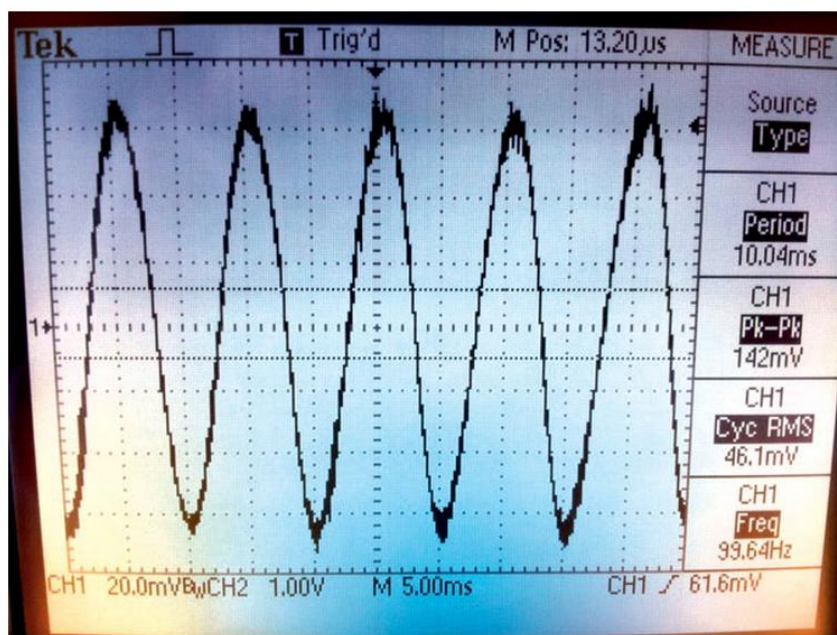


Figura 6.2.8 Ejemplo de onda de corriente de salida de un controlador LED a 700 mA

Aquí, un driver de 700mA proporciona realmente 652mA de corriente constante, con un rizado de corriente de 142mA pico a pico, es decir, del 21,8%, con una frecuencia de onda de 100 Hz (frecuencia de red 2x). El aspecto clave para el diseño o especificación de productos LED es asegurar que los drivers no se saturen a la corriente máxima requerida especificada por el fabricante del LED. Las mediciones típicas de la ondulación de la corriente LED se han visto hasta aproximadamente el 85% de la corriente nominal, por lo que ésta podría ser una de los principales factores de los LED y de los cables para algunos fabricantes, así que es importante comprobar que mantenemos al LED dentro de unos márgenes de seguridad.

Por supuesto, si el controlador de LED utiliza la tecnología de modulación de ancho de pulso, entonces su rizado es realmente del 100%, ya que la corriente a través del LED varía entre 0 y toda la corriente en una determinada frecuencia PWM. Si se requiere un alto control de la corriente, entonces desafortunadamente una gran desventaja de la modulación PWM es que la frecuencia de parpadeo se reduce a sólo unos pocos cientos de hertzios en el mejor de los casos.

La ventaja de los sistemas de LED es que la electrónica necesaria para controlar está avanzando a un ritmo acelerado y ahora es posible ver que se implementan tecnologías de controlador DC de conducción que son capaces de atenuar la salida del LED a menos de 1% sin usar PWM al controlar la corriente del LED con vida larga y rizado de corriente baja. Una tecnología así de prometedora es la tecnología de procesamiento de señal digital incorporado en la gama de drivers iDrive. La tecnología DSP controla

directamente la corriente del LED a una frecuencia de conmutación de hasta 120KHz y el rizado de corriente RMS usando condensadores de gran duración (300.000 horas en estado sólido) es de menos de 5% como se muestra en la figura 6.2.9:

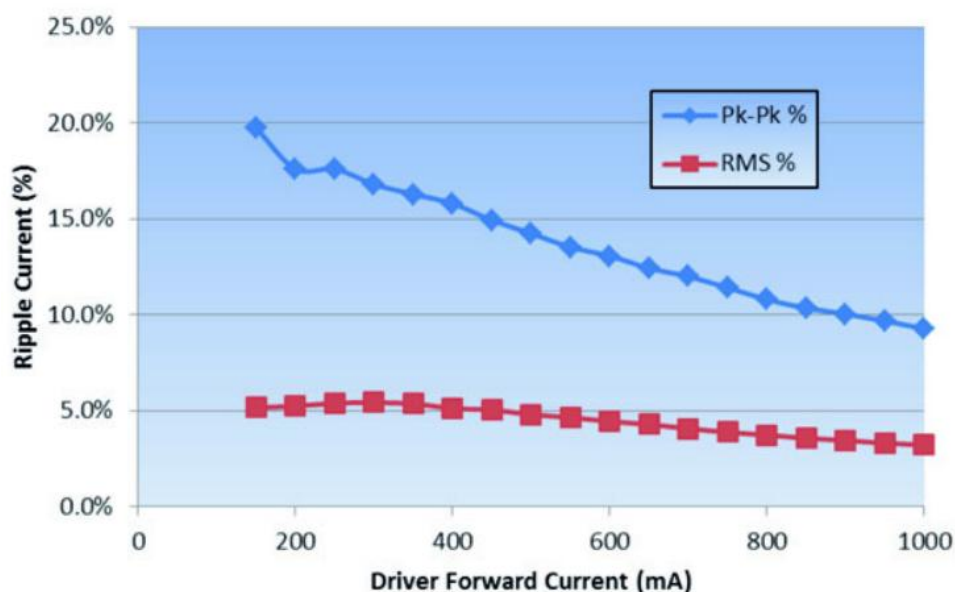


Figura 6.2.9 Variación del rizado de corriente en un driver DSP.

Este tipo de driver iDrive será el utilizado en el montaje experimental que se va a realizar en este proyecto. Por último, se va a dar algunos consejos sobre cómo evitar el parpadeo cuando se especifican proyectos:

- Consulte a un diseñador capacitado, con experiencia en aplicaciones en iluminación para evaluar la sensibilidad al parpadeo de ese proyecto.
- Pida a los fabricantes de cómo modula la producción de luz su producto:
 - LED driver
 - Integral PWM dimming (qué frecuencia y bits de resolución)
 - Regulación DC (a qué frecuencia de conmutación)
 - Comportamiento en los modos de fallo
- Esté al tanto de los componentes del sistema que pueden causar parpadeo
 - Interruptores regulables y controladores
 - Transformadores reductores conectado a menos de la carga mínima
- Comprenda la cuestión y esté al día

En conclusión, la luz artificial en general no plantea demasiado de un peligro. Sin embargo, ciertas tecnologías de iluminación ofrecen la oportunidad de mejorar la calidad de la iluminación desde el punto de vista visual humano mediante el aumento de la frecuencia de parpadeo y su porcentaje. Idealmente, todas las fuentes de luz deben tratar de mantener una frecuencia de parpadeo mayor de 30KHz y con un porcentaje de parpadeo de menos de 10%. Este es sin duda un gran desafío para la industria de la iluminación LED.

6.3 DISIPACIÓN DEL CALOR

En las uniones de los componentes semiconductores las pérdidas de potencia son convertidas en calor. Por otra parte, la temperatura de la unión no debe sobrepasar un valor límite ya que se produce la destrucción del semiconductor. La temperatura máxima de la unión es indicada por el fabricante. Cuando la cápsula del semiconductor no es capaz de estabilizar el calor generado, debe procederse a la evacuación externa mediante un disipador de calor.

Los disipadores están fabricados con materiales altamente conductores del calor (normalmente aleaciones de aluminio). Debe ponerse especial atención al contacto entre la cápsula del componente y el disipador. Una superficie limpia y perfectamente lisa es necesaria para asegurar este contacto, siendo además muy recomendable (y necesario en aplicaciones de elevada potencia) el uso de pasta termoconductora, que asegure este contacto a nivel microscópico.

6.3.1 CONCEPTO Y FORMAS DE DISIPACION

Un disipador de calor debe ser un elemento que transfiere el calor generado en el semiconductor al ambiente (cuando se habla de ambiente, se trata del medio de refrigeración, que puede ser aire, agua, aceite, etc.), de un forma mucho más eficaz que la propia cápsula del semiconductor. Para conseguir este efecto es necesario un especial diseño del mismo, hasta llegar al compromiso de efectividad, facilidad de utilización y economía.

La disipación de calor se produce de tres maneras: conducción térmica, radiación y convección.

1- Conducción térmica:

Es la capacidad de transmitir el calor de un sitio a otro. Los materiales usados en la práctica que mejor conducen el calor son el aluminio y el cobre. Además, dichos materiales también son excelentes conductores eléctricos, lo que los hacen especialmente adecuados para elevadas potencias, donde en ocasiones el disipador también tiene la función de conductor eléctrico. Para que un disipador sea efectivo, no es suficiente con la conducción térmica (no sirve de nada transportar el calor de un sitio a otro si no se extrae de alguna forma), y se debe complementar con los efectos de radiación y convección.

2- Radiación:

Al ser calentados, todos los cuerpos emiten energía en forma de emisión infrarroja. Esta es una forma de eliminar el calor de los mismos, y su efectividad varía con las características de la superficie radiante. La longitud de onda de la energía emitida depende de la temperatura y varía con la misma. Teniendo en cuenta que una superficie negra puede emitir en muchas longitudes de onda, en general, dicha superficie es la más efectiva a cualquier temperatura. Por dicha razón, los disipadores se acostumbran a acabar en negro.

3- Convección:

Esta es la forma más eficaz de eliminar el calor, y se basa en la transmisión del calor desde la superficie del disipador al ambiente (ya sea aire, agua o aceite). Esta transmisión dependerá de la superficie de contacto entre disipador-ambiente. Por dicha razón, la forma de los disipadores se diseña para conseguir el máximo de superficie por unidad de volumen.

También afecta al rendimiento la cantidad de fluido refrigerante que circula por dicha superficie. En situaciones normales, el fluido refrigerante, al calentarse, tiende a subir, por lo que los radiadores deben utilizarse con las aletas en posición vertical para un rendimiento óptimo (convección natural). Si se incrementa la cantidad de aire, agua o aceite que circula por dicha superficie, se aumenta aún más el rendimiento, por lo que se utiliza también la convección forzada (mediante ventiladores, bombas, etc.).

6.3.2 DISEÑO Y USO CORRECTO DEL DISIPADOR

El diseño de un disipador, si bien puede hacerse de forma teórica, es tan complejo que en la práctica se realiza por experimentación. Es recomendable utilizar siempre márgenes de seguridad ya que las variables que afectan al rendimiento son difícilmente controlables en las aplicaciones reales,. Un margen sistemático del 20% nos permitirá obtener una buena garantía de funcionamiento.

El valor de disipación (RTH_{hsa}) se indica siempre en $^{\circ}C/W.$, siendo los datos referidos a varias longitudes de radiador para diferentes potencias de disipación (W). Para otras aplicaciones pueden utilizarse factores de corrección que se indican a continuación. Las gráficas indicadas en el catálogo, para radiadores de aluminio extruido, se refieren a convección natural, con acabado anodizado negro y aletas en posición óptima (vertical).

6.3.2.1 Factores de corrección

Para obtener el valor de resistencia térmica disipador-ambiente (R_{THsa}), deben tenerse en cuenta algunos valores, referidos a:

- La posición (caso de convección natural), K1
- La velocidad del refrigerante (caso de convección forzada), K2
- La altura (caso de refrigeración por aire), K3

En el primer caso la posición óptima de funcionamiento es con las aletas posición vertical, de forma que el refrigerante (normalmente aire), circule libremente por las mismas. Para otras posiciones, los factores de conversión son los indicados en la siguiente figura 6.3.1 (los casos indicados entre paréntesis sólo son válidos para radiadores tipo "peine"):

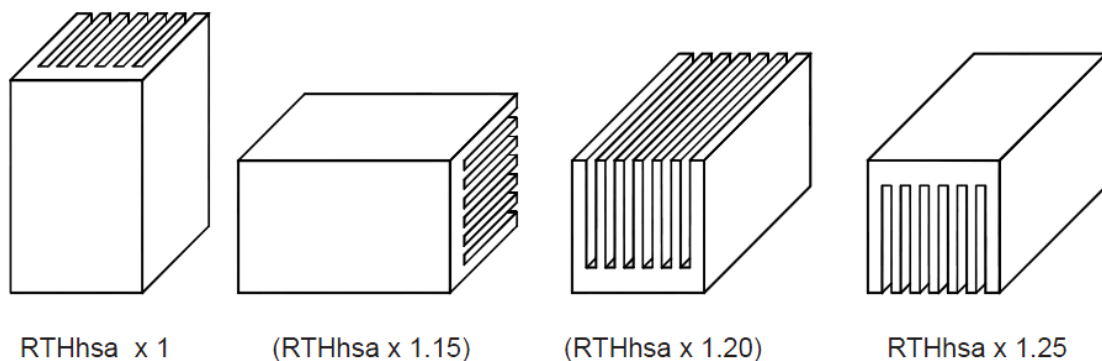


Figura 6.3.1 Factor corrector K1 de la resistencia térmica disipador-ambiente en función de la posición

Por ejemplo, un radiador tipo, cuyos datos nos indican un valor de $R_{THsa} = 0.41^{\circ}\text{C}/\text{W}$., en posición horizontal debemos efectuar una corrección $K1=1.20$. En cuanto a la velocidad del refrigerante y a la altura, puede utilizarse la siguiente gráfica (figura 5.3.2^a y b) para obtener el factor de conversión K2 y K3 necesario para calcular la disipación con convección forzada (aire). Los datos se refieren al valor de disipación con convección natural (indicado en catálogo), y a la velocidad del aire en metros por segundo. Debemos considerar que el aire no tiene la misma densidad al nivel del mar que a gran altura, por lo que el rendimiento disminuye al aumentar la altura de trabajo

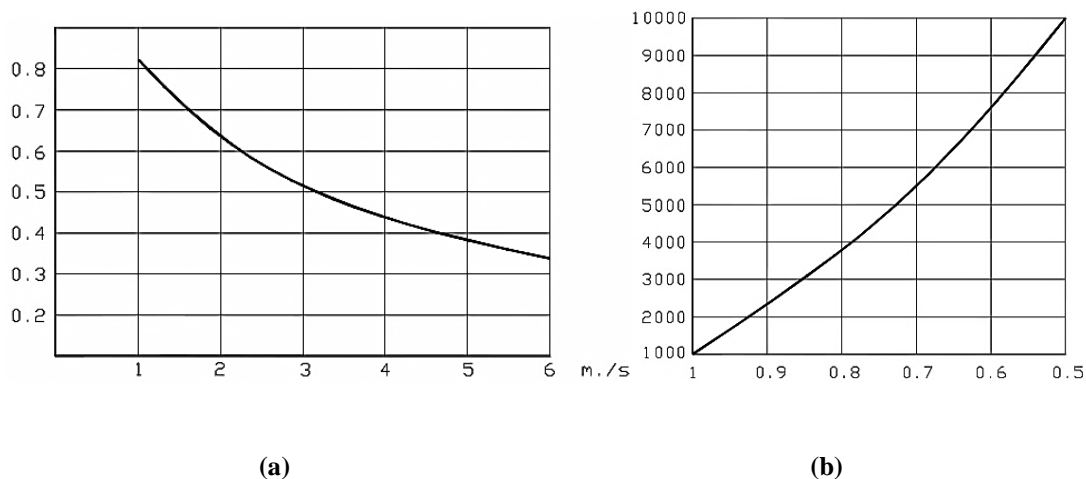


Figura 6.3.2 Factor corrector de la resistencia térmica disipador-ambiente en función de la velocidad del refrigerante y de la altura

— °C/W

6.3.2.2 Formas de cálculo

Para el cálculo del disipador idóneo son necesarios los siguientes datos:

- 1- La resistencia térmica entre la cápsula y el disipador (R_{THchs}).
- 2- La resistencia térmica interna entre la unión y la cápsula (R_{THjc}).
- 3- La pérdida de potencia en el semiconductor (W).
- 4- La resistencia térmica entre disipador y ambiente (R_{THhsa}).

El concepto de dichos valores puede representarse de forma similar a la asociación de resistencias, como se indica en la figura 6.3.4 siguiente:

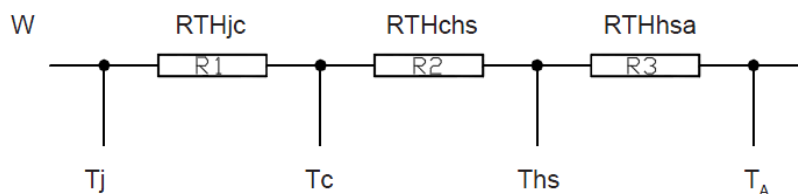


Figura 6.3.4 Representación de la temperatura en función de las resistencias térmicas y potencia.

Donde W es la potencia disipada, T_j es la temperatura de la unión, T_c es la temperatura de la cápsula, T_{hs} es la temperatura del disipador y T_A es la temperatura ambiente.

El incremento de temperatura de la unión será el siguiente:

$$\Delta T_j = W \times (R_{THjc} + R_{THchs} + R_{THhsa})$$

Y la temperatura de la unión corresponderá a:

$$T_j = T_A + \Delta T_j \text{ ó } T_j = W \times (R_{THjc} + R_{THchs} + R_{THhsa}) + T_A$$

En el cálculo inverso, la resistencia térmica del disipador a utilizar (R_{THhsa}) será:

$$R_{THhsa} = ((T_j - T_A) / W) - (R_{THjc} + R_{THchs})$$

Para el cálculo de disipación de los semiconductores pueden utilizarse los cálculos indicados a continuación:

- Cables: -
- Diodos y tiristores: $W = V_0 \cdot I + I^2 \cdot FF^2 \cdot R_0$

donde W es la potencia disipada en vatios, R_c es la resistencia del cable, ρ su resistividad según el material (tabla 5.3.1), L es la longitud del cable, S es la sección del cable, V_0 es el valor de cálculo (indicado por el fabricante) en voltios, I es la corriente de trabajo, FF es el factor de forma de la onda (para corriente continua (DC) = 1) y R_0 es la resistencia equivalente (indicada por el fabricante) en Ohmios.

Tabla 6.3.1 Resistividades de algunos materiales

MATERIAL	RESISTIVIDAD (a 20°C~25°C) ($\Omega \cdot m$)	RESISTIVIDAD ($\Omega \cdot mm^2/m$)
Plata	$1,55 \times 10^{-8}$	0,0155
Cobre	$1,71 \times 10^{-8}$	0.0171
Oro	$2,35 \times 10^{-8}$	0,0235
Aluminio	$2,82 \times 10^{-8}$	0,0282
Wolframio	5.65×10^{-8}	0,0565
Niquel	$6,4 \times 10^{-8}$	0,064
Hierro	$9,71 \times 10^{-8}$	0,0971
Platino	$10,6 \times 10^{-8}$	0,106
Estaño	$11,5 \times 10^{-8}$	0,115
Acero inoxidable 301	72×10^{-8}	0,72
Grafito	60×10^{-8}	0,6

6.3.3 RENDIMIENTO DE LOS DISIPADORES

Según sea la potencia y el tipo de componente a disipar, deberá seleccionarse un tipo u otro de disipador. Teniendo en cuenta que existe una amplia gama de utilización, a continuación se describen las características generales de los disipadores más habituales:

Disipadores de aluminio extruido:

Este tipo es el más generalizado, los perfiles abarcan secciones de pocos cm² hasta varios centenares de cm². La capacidad de disipación (dependiendo del perfil y la longitud) abarca desde 80°C/W. (pequeños perfiles con un peso inferior a 300 gr/m.) hasta los 0,2°C/W (grandes perfiles con pesos de 40 Kg/m). Su aplicación abarca desde la refrigeración de circuitos integrados hasta la de semiconductores press-pack de elevadas potencias (algunos centenares de vatios).

Disipadores de aluminio y cobre estándar:

Son pequeños disipadores realizados a partir de perfiles de aluminio, chapa de aluminio troquelada o cobre (troquelado o mecanizado). Se utilizan para pequeñas potencias, microelectrónica y electrónica en general. En muchos casos, está prevista su adaptación para el montaje sobre circuitos impresos.

Disipadores de aluminio de alto rendimiento:

Se trata de disipadores de última generación. En su diseño se busca la mayor superficie de contacto posible con el aire, con el mínimo volumen. Por su concepción, se utilizan siempre con refrigeración forzada.

En conjunto estos disipadores permiten obtener elevados rendimientos con refrigeración forzada (valores superiores al K_w). Su utilización está prevista para la refrigeración de módulos de potencia, transistores, IGBT, etc. con una excelente relación volumen/potencia disipada.

Disipadores con refrigeración líquida:

Se fabrican principalmente en cobre (aunque también en aluminio). Con los mismos se obtienen capacidades de disipación muy elevadas (del orden de varios K_w). El medio

refrigerante es un líquido (normalmente agua), que circula por el circuito mediante la ayuda de una bomba.

Existen en configuraciones sencillas, basadas en el taladrado de conductos a través de un bloque de cobre, y también de ejecuciones "a medida", con canales fresados en el bloque y con tapa posterior, que permiten adaptarse a aplicaciones complejas y específicas. En general, se utilizan en electrónica de potencia para la refrigeración de semiconductores en aplicaciones como baños electrolíticos, hornos industriales (inducción), etc.

Por último, a continuación se muestra K_w en función de la disipación en la figura 6.3.5:

GRAFICO REPRESENTATIVO DE GAMAS.

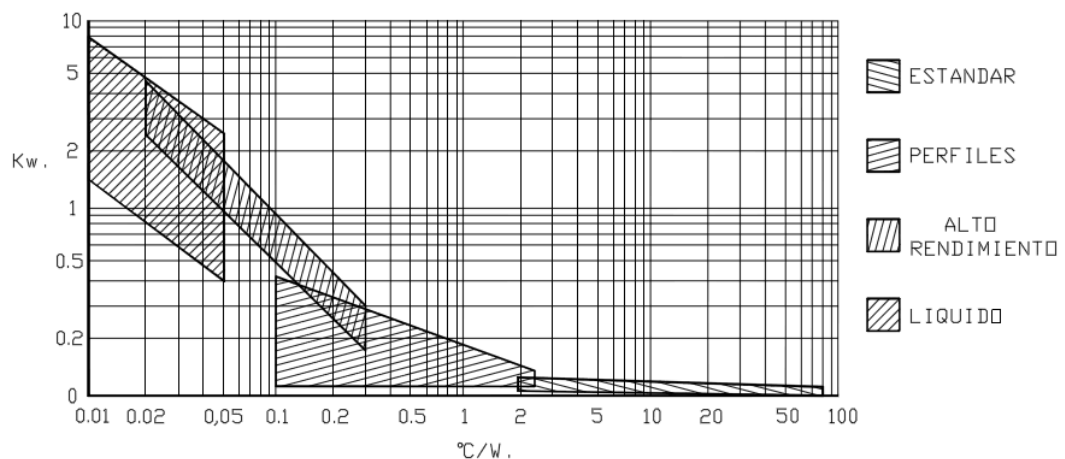


Figura 6.3.5 Representación de K_w en función de la disipación para las distintas tecnologías

CAPÍTULO 7 - APLICACIONES DE LUMINARIAS EN ESTADO SÓLIDO

La aplicación más directa que tienen los LEDs sobre el campo de la domótica es conseguir una adecuada iluminación y ambientación, según la situación lo requiera, ya que la domótica se basa en hacer la estancia en el hogar, o en un edificio cualquiera, lo más agradable y cómoda posible.

El LED no es una bombilla, sino un circuito electrónico, con una adaptación a la domótica más simple que la iluminación convencional. Los LEDs están preparados para que puedan ser controlados por una centralita u ordenador la intensidad de la luz, la cantidad de focos que tienen que estar encendidos o apagados, o programar un horario por razones de seguridad.

Se está trabajando en integrar la tecnología LED en la iluminación actual. Por ello, en vez de cambiar las costumbres de iluminación, se desarrollan bombillas compuestas por LEDs con disipador, como puede verse en la figura 7.1:



Figura 7.1 Bombilla LED XanLite 5W

De esta forma, todas las luminarias que funcionan con bombillas incandescentes o de descarga de vapor de sodio podrán funcionar. El inconveniente que se presenta es una reducción de la vida útil de la bombilla debido a la no óptima evacuación del calor en el diodo. A pesar de esta reducción de vida útil, son en general las más duraderas del mercado, y también las más caras.

Los LEDs en la actualidad se pueden acondicionar o incorporarse en un porcentaje mayor al 90 % a todas las tecnologías de iluminación actuales, casas, oficinas, industrias, edificios, restaurantes, arenas, teatros, plazas comerciales (figura 7.2), gasolineras, calles y avenidas, estadios (en algunos casos por las dimensiones del estadio no es posible porque quedarían espacios oscuros), conciertos, discotecas, casinos, hoteles, carreteras, luces de tráfico o de semáforos, señalizaciones viales, universidades, colegios, escuelas, estacionamientos, aeropuertos, sistemas híbridos,

celulares, pantallas de casa o domésticas, monitores, cámaras de vigilancia, supermercados, en transportes (bicicletas, motocicletas, automóviles, camiones tráiler, etc.), en linternas de mano, para crear pantallas electrónicas de LED (tanto informativas como publicitarias) y para cuestiones arquitectónicas especiales o de arte culturales. Todas estas aplicaciones se dan gracias a su diseño compacto.



Figura 7.2 Pantalla en Fremont Street, Las Vegas

También existen LEDs aplicados al automovilismo, dotando al vehículo de luces diurnas (figura 7.3):



Figura 7.3 LEDs diurnas de automovil

Los diodos infrarrojos (IRED) se emplean desde mediados del siglo XX en mandos a distancia de televisores, habiéndose generalizado su uso en otros electrodomésticos como equipos de aire acondicionado, equipos de música, etc., y, en general, para aplicaciones de control remoto así como en dispositivos detectores, además de ser utilizados para transmitir datos entre dispositivos electrónicos como en redes de computadoras y dispositivos como teléfonos móviles, computadoras de mano, aunque esta tecnología de transmisión de datos ha dado paso al bluetooth en los últimos años, quedando casi obsoleta.

Los LEDs se emplean con profusión en todo tipo de indicadores de estado (encendido/apagado) en dispositivos de señalización (de tránsito, de emergencia, etc.) y en paneles informativos (el mayor del mundo, del NASDAQ, tiene 36,6 metros de altura y está en Times Square, Manhattan). También se emplean en el alumbrado de pantallas de cristal líquido de teléfonos móviles, calculadoras, agendas electrónicas, etc., así como en bicicletas y usos similares. Existen además impresoras con LEDs.

La pantalla de LEDs es muy brillante formada por filas de verdes, azules y rojos ordenados según la arquitectura RGB, controlados individualmente para formar imágenes vivas muy brillantes, con un altísimo nivel de contraste. Entre sus principales ventajas, frente a otras pantallas, se encuentran: buen soporte de color, brillo extremadamente alto (lo que le da la capacidad de ser completamente visible bajo la luz del sol), y altísima resistencia a impactos (figura 7.4).



Figura 7.4 Pantalla de ledes en el Estadio de losArkansas Razorbacks.

El uso de LEDs en el ámbito de la iluminación (incluyendo la señalización de tráfico) es moderado y es previsible que se incremente en el futuro, ya que sus prestaciones son superiores a las de la lámpara incandescente y la lámpara fluorescente, desde diversos puntos de vista. La iluminación con LEDs presenta indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente, capacidad para operar de forma intermitente de modo continuo, respuesta rápida, etc. Asimismo, con LEDs se pueden producir luces de diferentes colores con un rendimiento luminoso elevado, a diferencia de muchas de las lámparas utilizadas hasta ahora que tienen filtros para lograr un efecto similar (lo que supone una reducción de su eficiencia energética). Cabe destacar también que diversas pruebas realizadas por importantes empresas y organismos han concluido que el ahorro energético varía entre el 70 y el 80 % respecto a la iluminación tradicional que se utiliza hasta ahora. Todo ello pone de manifiesto las numerosas ventajas que los LEDs ofrecen en relación al alumbrado público.

Los LEDs de luz blanca son uno de los desarrollos más recientes y pueden considerarse como un intento muy bien fundamentado para sustituir los focos o bombillas actuales (lámparas incandescentes) por dispositivos mucho más ventajosos. En la actualidad se dispone de tecnología que consume el 92 % menos que las lámparas incandescentes de uso doméstico común y el 30 % menos que la mayoría de las lámparas fluorescentes; además, estos LEDs pueden durar hasta 20 años y suponer el 200 % menos de costos totales de propiedad si se comparan con las lámparas o tubos fluorescentes convencionales. Estas características convierten a los LEDs de luz blanca en una alternativa muy prometedora para la iluminación.

También se utilizan en la emisión de señales de luz que se transmiten a través de fibra óptica. Sin embargo esta aplicación está en desuso ya que actualmente se opta por tecnología láser que focaliza más las señales de luz y permite un mayor alcance de la misma utilizando el mismo cable. Sin embargo en los inicios de la fibra óptica eran usados por su escaso coste, ya que suponían una gran ventaja frente al coaxial (aún sin focalizar la emisión de luz).

CAPÍTULO 8 - MONTAJE EXPERIMENTAL: MAFILED

En este capítulo se va a modificar una luminaria de tipo incandescente para convertirla en LED. Se trata, como se ha indicado en la introducción, de un foco utilizado en la iluminación de las zonas próximas al escenario del teatro. Este montaje se realiza en colaboración con las siguientes entidades:

- ONG ABENIN por los derechos de la infancia
- Teatro de Alcobendas
- Luminarias STONEX S.L.
- UNED

Este proyecto ha contado con la ayuda especial del presidente de Abenin, también técnico de iluminación del teatro de Alcobendas. El dinero que se obtenga de la posible comercialización de la luminaria será destinado a promover los derechos de la infancia, principalmente en Colombia, donde la ONG Abenin desarrolla principalmente sus actuaciones.

8.1 PUNTO DE PARTIDA: MAFILUX

La luminaria “MAFILUX” consiste en un foco de bombilla halógena lineal para iluminación interior. Es una fuente de luz única, pensada por los técnicos y para los técnicos, que responde a necesidades de trabajo en escenarios, estudios de televisión, carpas, rodajes de cine, estudios de fotografía, etc. La falta de visibilidad, o visibilidad reducida, es un problema básico de todos los técnicos del espectáculo, que afecta directamente a la calidad y seguridad de su trabajo.

La solución no se encuentra solo en la utilización de mayores potencias de luz. Es necesario que estos puntos de luz sean sencillos en su manipulación, colocación y distribución. **Mafilux** proporciona condiciones óptimas de trabajo, sin necesidad de invertir un esfuerzo extra:

- Transporte cómodo.
- Colocación práctica.
- Manejo sencillo.
- Mínimo espacio de instalación.
- Peso ligero.
- Multi-funcional, con 3 fuentes luminosas perfectamente integradas y manejables de forma independiente.

Sus especificaciones son las siguientes

- **Modelo de Lámpara: Halógena lineal, R7s 230V / 1000W**
- Flujo luminoso: 22.000 lúmenes
- Vida media: 2000 horas
- Longitud del cuerpo luminoso: 125 mm

- Distancia entre contactos: 185,7 mm
- Diámetro: 12 mm
- Fusible rápido: 6,3 A
- Casquillo: R 7s-15
- Temperatura de color: 3000 K

En estas especificaciones se marca el flujo luminoso como 22.000 lúmens, a partir del flujo luminoso de la bombilla. Sin embargo, como puede verse en la figura 8.1.1, el reflector que lleva incorporado tiene una abertura para facilitar la ventilación. Esta abertura introduce unas pérdidas ópticas por reflexión, ya que parte de la luz emitida por la bombilla halógena no es reflejada sino absorbida. Esto reduce el flujo luminoso total.



Figura 8.1.1 Foco Mafilux; detalle del reflector interno.

Mafilux integra 3 luminarias que pueden trabajar de forma conjunta o independiente, y que, anclados a una estructura común, nos permiten múltiples juegos de colocación y ángulos de proyección, como puede verse en la figura 8.1.2:



Figura 8.1.2 Sistema Mafilux

8.2 USO AL QUE SE DESTINA EL DISPOSITIVO

El foco que este proyecto va a describir tiene su utilización en la iluminación escénica. Dentro de este ámbito existen múltiples áreas a iluminar, y cada una de ellas con diferentes características. Nada tiene que ver las exigencias para un foco destinado a iluminar el escenario con el que se requiere para la zona de butacas. A continuación en la figura 8.2.1 se muestra el plano de planta del escenario, en el que pueden distinguirse con claridad las siguientes zonas:

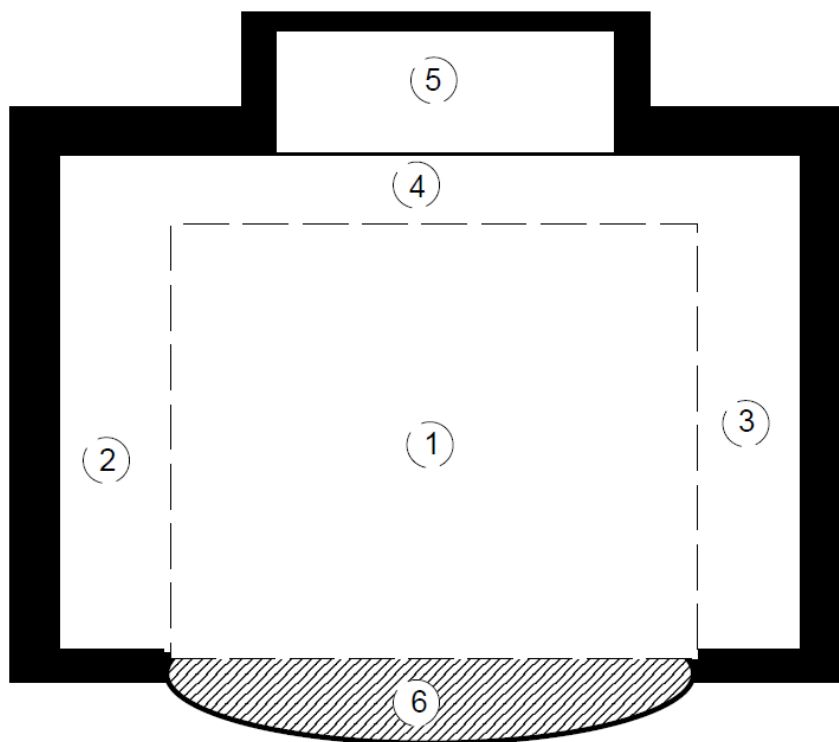


Figura 8.2.1 Planta del escenario

- 1.- El espacio escénico está definido en el plano por una línea discontinua, definiendo un supuesto espacio.
2. y 3.- Son los hombros también llamados costados y corresponden al espacio a derecha e izquierda del arco de embocadura. Sirven para desalojar de la escena trastos, ocultarse los actores, preparar efectos, etc., denominamos hombro drcho. e izdo.n desde el punto de vista del actor o técnico mirando al público. Lo más correcto es que la suma de los hombros sea igual a las medidas del espacio escénico, aunque hay muchos teatros que no cumplen este requisito.
- 4.- El foro es la parte del escenario más lejana al público y se delimita por el espacio que queda del último telón o fondo de decorado a la pared del torreón contraria a la embocadura. Este espacio nos permite pasar de un hombro a otro sin ser vistos por el público. Es lo contrario de Aforo, que es la zona donde se sitúa al público.
- 5.- La chácena se encuentra detrás de la zona de foro aunque no todos los teatros la tienen. Si es muy alta suele tener su propio telar y nos sirve para ampliar el espacio escénico. En otros casos sirve para almacenar o desalojar elementos de utilería o decorado por el foro.

6.- La corbata o proscenio es la zona del espacio escénico más cercana al público. Está por delante del telón de boca y en muchos casos parte de ella es el techo del foso de músicos, en forma de arco aludiendo a la forma oval que tiene el patio de butacas.

El dispositivo de iluminación MafiLED será destinado a iluminar los hombros y el foro, permitiendo que los artistas, técnicos y operarios que tengan que utilizar estas zonas puedan moverse con comodidad, como puede verse en la figura 8.2.2:

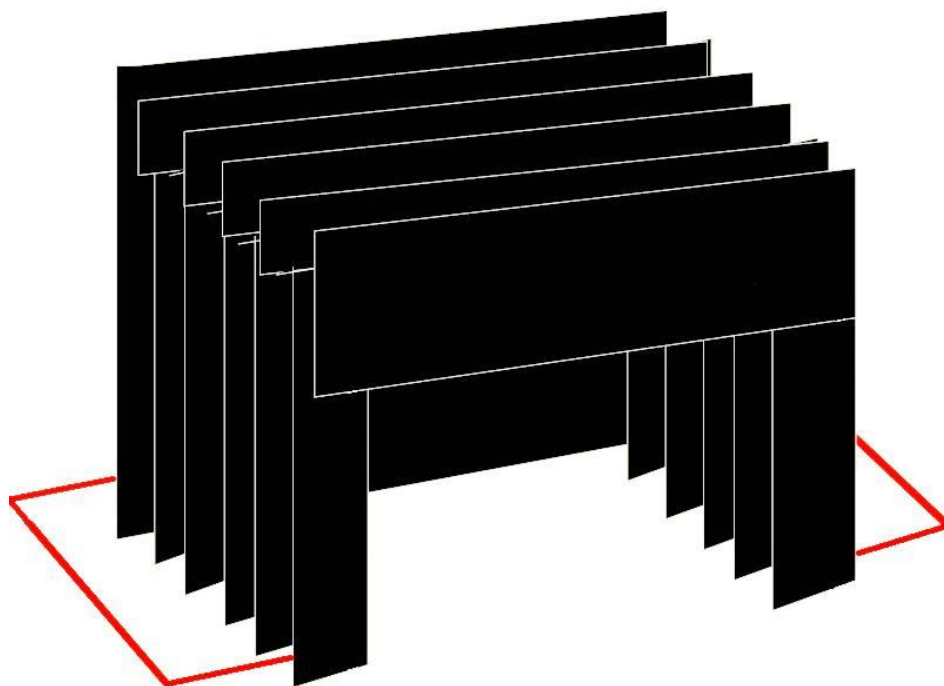


Figura 8.2.2 Áreas en las que se utilizará habitualmente el dispositivo

Para conseguir este objetivo el foco deberá crear un “pasillo” de luz suficientemente ancho como para iluminar estas zonas, pero con posibilidad de limitar el haz para que no ilumine zonas deseadas. El foco inicial es de luz incandescente, cuyo objetivo se limita a la iluminación de estas zonas. Sin embargo, MAFILED tendrá aplicación más allá de estos límites. Se va a crear un foco capaz de crear esos “pasillos” de luz, pero con capacidad de controlar la luz, tanto su color como su intensidad. Esta capacidad permite su uso en espectáculos como pueden ser desfiles de moda, por ejemplo.

8.3 ESPECIFICACIONES

El foco resultante debe tener una capacidad de iluminación similar al foco original. Como ya se ha indicado, el flujo del foco resultante debe estar entre 10.000 y 15000 lumens para mantener un flujo luminoso similar al del foco inicial Mafilux.

El tamaño del foco debe mantenerse intacto. La carcasa de la luminaria original será la misma que en el MAFILED, ya que de este modo, se mantendrá una de las grandes ventajas de este foco como es la modularidad del sistema trapezoidal y la posibilidad de situarlo en las barras del teatro que se suspenden del techo.

La luminaria debe ser capaz de emitir luz de color. Esta característica del foco a construir representa un avance fundamental respecto al original, y le habilita para su utilización en aplicaciones no solo de iluminación básica en zonas de trabajo, sino también en zonas del espectáculo, como el escenario, el proscenio, o una pasarela, por ejemplo.

El control del color e intensidad tienen que ser llevados a cabo desde la mesa de control. Es necesario que el driver instalado opere en los protocolos de funcionamiento de la mesa de control, y de este modo, mesa y luminaria “hablen” el mismo idioma.

Por último, MAFILED debe ser un foco robusto, tanto en su composición física como en su durabilidad. Por tanto, se asegurará una ventilación adecuada y se protegerá las bombillas LED de posibles impactos. También es importante que las uniones entre elementos y carcasas tengan la máxima fiabilidad, protegiendo de este modo a los empleados que lo vayan a utilizar.

8.4 COMPONENTES

Una vez presentadas las especificaciones, se muestran a continuación los componentes que se utilizarán para llevar a cabo el proyecto. Es evidente que los elementos elegidos no son la única solución. Se trata de unidades válidas para la aplicación en cuestión y disponibles para su adquisición, a un precio razonable.

8.4.1 BOMBILLAS LED

En primer lugar se planteó la idea de obtener una luz blanca de trabajo, de las mismas características de luminosidad que el foco original. En vista del cambio de características internas, de peso y electrónica que la luminaria va a pasar a tener, se decidió darle más utilidad. Este intento consiste en utilizar bombillas capaces de generar luz de color. Actualmente, existen en el mercado configuraciones como las que se muestra en la figura 8.4.1:



Figura 8.4.1 Foco LED RGB

Este foco en concreto cuenta con 36 LEDs de 1W. El color se consigue mediante la mezcla aditiva de la luz de cada LED. Sin embargo, los fabricantes más importantes de bombillas LED han desarrollado bombillas de nueva generación en las que cada LED genera directamente el color deseado (figura 8.4.2). Esto supone una gran ventaja en la obtención del color deseado, que será de mejor calidad.

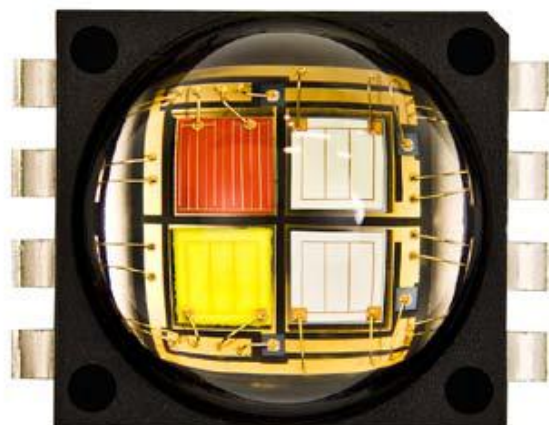


Figura 8.4.2 LED CREE® XLamp® MC-E Color

Como puede verse, se trata de una bombilla que integra cuatro LEDs dentro de una óptica. Los diodos LEDs internos son de color rojo (esquina superior izquierda), verde (esquina superior derecha), azul (esquina inferior derecha) y blanco (esquina inferior izquierda). Como se ha indicado en el capítulo 4, el diodo LED blanco consiste en un LED azul al que se le añade una capa fosfórica, de fotoemisión amarilla. También se aprecian ocho contactos, cuatro a cada lado. Estas patillas son conectadas al circuito interno de la placa de montaje o PCB. Controlando cada LED interno mediante un canal es posible determinar el color que emitirá cada bombilla y su intensidad.

Esta nueva tecnología no solo es aplicable en LEDs de color sino también en iluminación general. Existen configuraciones comerciales de LEDs de luz blanca que simplifican al máximo el control y alimentación, y también hay LEDs comerciales que ofrecen la posibilidad de elegir el blanco que se desee en cada momento (figura 8.4.3):

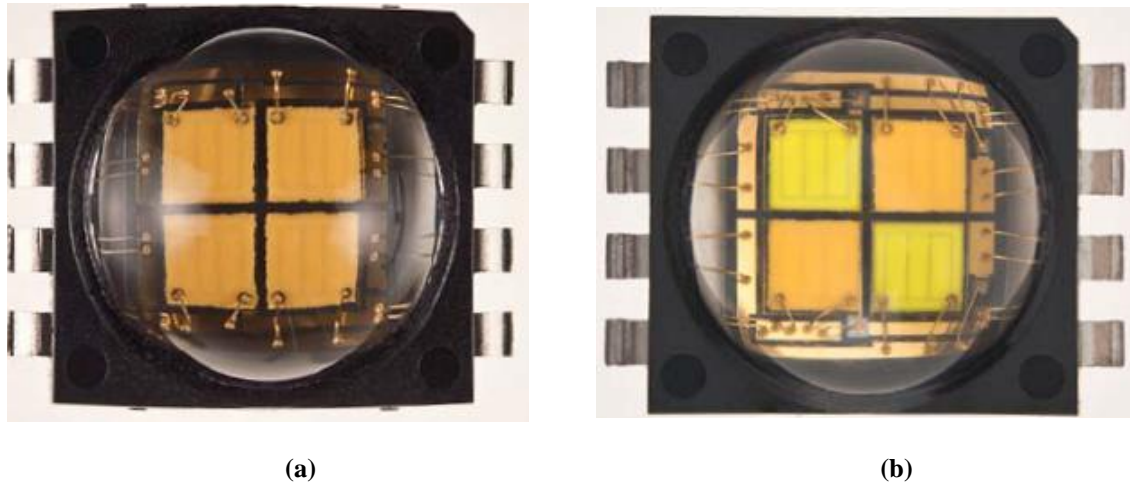


Figura 8.4.3 LEDs CREE® XLamp® MC-E; (a) White; (b) Dynamic White

El modelo de la figura 8.4.3 (a) corresponde a un blanco de una determinada temperatura de color disponible: 10000K~5000K (cool white), 5000K~3700K (neutral white) y 3700K~2600K (warm white) (ya se indicó en el capítulo 4 que los LEDs van cambiando la temperatura de su color a lo largo de su vida útil). A mayor temperatura de color, mayor eficiencia y menor índice de reproducción cromática. El modelo “Dynamic white” consta de dos LEDs de 6000K y dos de 2700K de temperatura. Mediante dos canales, es posible controlar y modificar la temperatura de la luz blanca obtenida, de más eficiente a más cálida. La figura 8.4.4 muestra el blanco correspondiente a varias temperaturas:

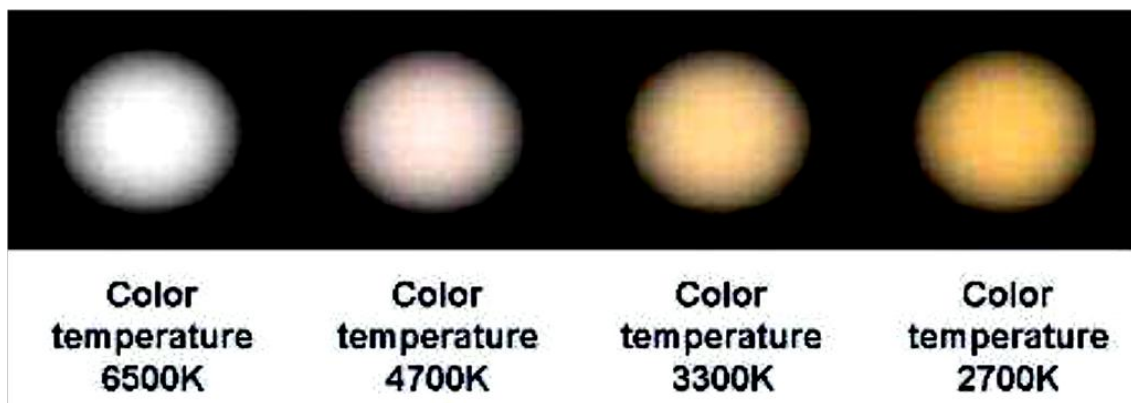


Figura 8.4.4 Color blanco obtenido y su temperatura correspondiente

Por tanto, se va a utilizar LEDs CREE® XLamp® MC-E Color. Los datos luminosos que nos proporciona el fabricante, y que aparecen en la tabla 8.4.1, son a la temperatura de la unión $T_j=25^{\circ}\text{C}$:

Tabla 8.4.1 Datos luminosos correspondientes al modelo CREE® XLamp® MC-E

MODELO	COLOR	CCT (K)/LONGITUD DE ONDA DOMINANTE (nm)		FLUJO LUMINOSO @350 mA	
		MIN	MAX	MIN	MAX
BLANCO	BLANCO FRÍO	5000K	10000K	370 lm	430 lm
	BLANCO NEUTRO	3700K	50000K	320 lm	370 lm
	BLANCO CÁLIDO	2600K	3700K	240 lm	320 lm
BLANCO DINÁMICO	2 BLANCOS FRÍOS	6500K		100 lm	
	2 BLANCOS CÁLIDOS	2700K		70 lm	
COLOR	ROJO	620 nm	630 nm	30,6 lm	
	VERDE	520 nm	535 nm	67,2 lm	
	AZUL	450 nm	465 nm	8,2 lm	
	BLANCO FRÍO	5700K	7000K	100 lm	
	ROJO	620 nm	630 nm	30,6 lm	
	VERDE	520 nm	535 nm	67,2 lm	
	AZUL	450 nm	465 nm	8,2 lm	
	BLANCO CÁLIDO	3700K	4300K	80 lm	

A continuación en la figura 8.4.5 se muestra la distribución espectral de energía:

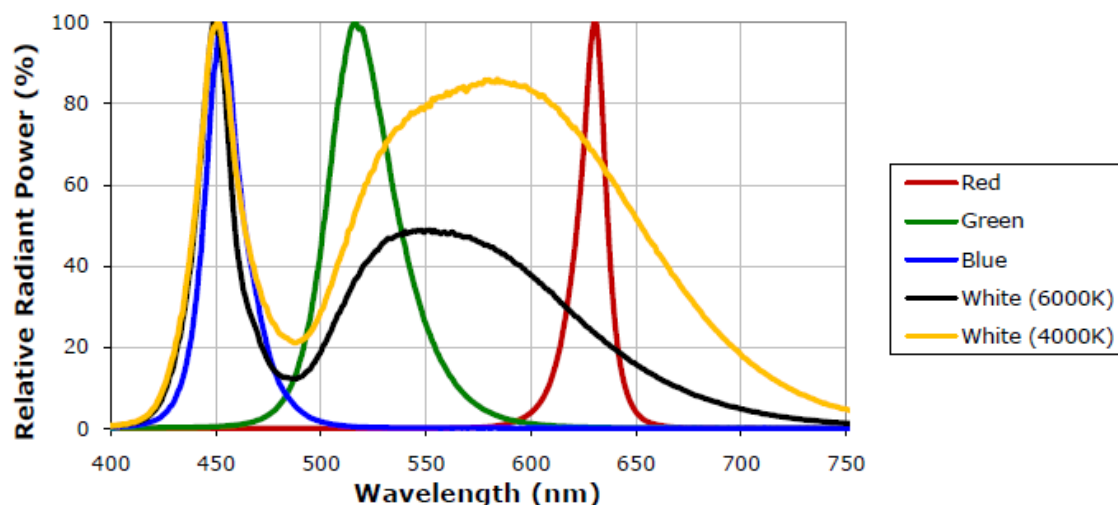


Figura 8.4.5 Distribución de energía espectral relativa del LED CREE® XLamp® MC-E Color ($I_F=350$ mA)

Se puede apreciar que hay diferencia entre el LED CREE® XLamp® MC-E que incluye un LED blanco de temperatura 4000K y el de 6000K. El fabricante permite analizar esta diferencia mediante el gráfico de la figura 8.4.6:

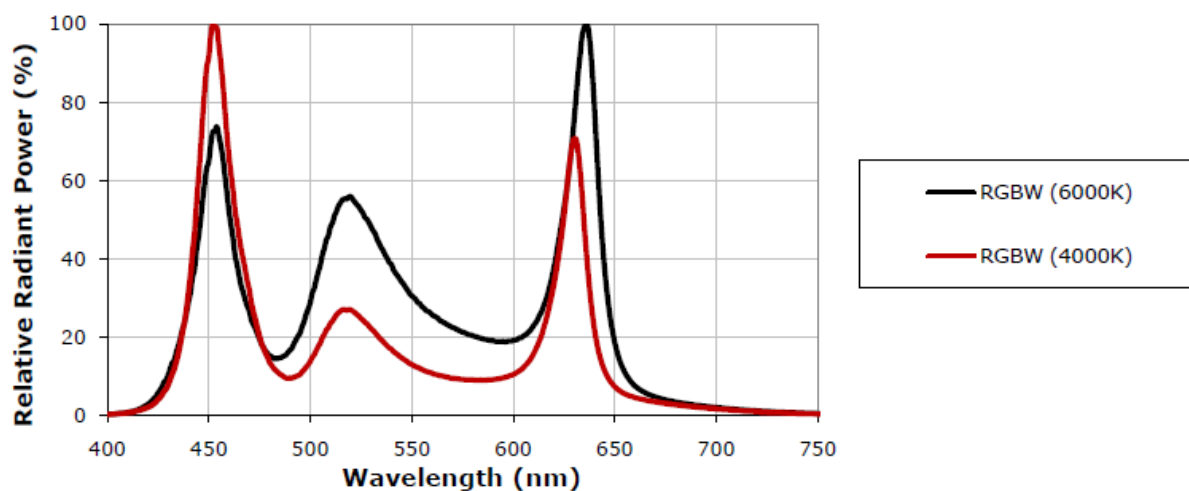


Figura 8.4.6 Distribución de energía espectral relativa ($I_F=350$ mA)

A continuación se muestran las características de la bombilla vista en conjunto:

- Resistencia térmica, de la unión al punto de soldadura: $R_{TH}=4^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- Ángulo de emisión FWHM= 115°
- Temperatura máxima de la unión $T_{MAX}=150^{\circ}\text{C}$

En la tabla 8.4.2 aparecen las características de cada LED incluido en el interior de cada bombilla:

Tabla 8.4.2 Características del LED interno de la bombilla

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES		ROJO	VERDE	AZUL	BLANCO
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE VOLTAJE	mV/°C	Tip.	-2	-4	-4	-4
CORRIENTE DIRECTA	mA	Max.	700	700	700	700
TENSIÓN INVERSA	V	Max.	5	5	5	5
TENSIÓN DIRECTA (350 mA)	V	Tip.	2,1	3,4	3,2	3,2
		Max.	2,3	3,9	3,9	3,9
TENSIÓN DIRECTA (700 mA)	V	Tip.	2,5	3,7	3,5	3,5

En la figura 8.4.7 el fabricante muestra la curva I-V de cada LED:

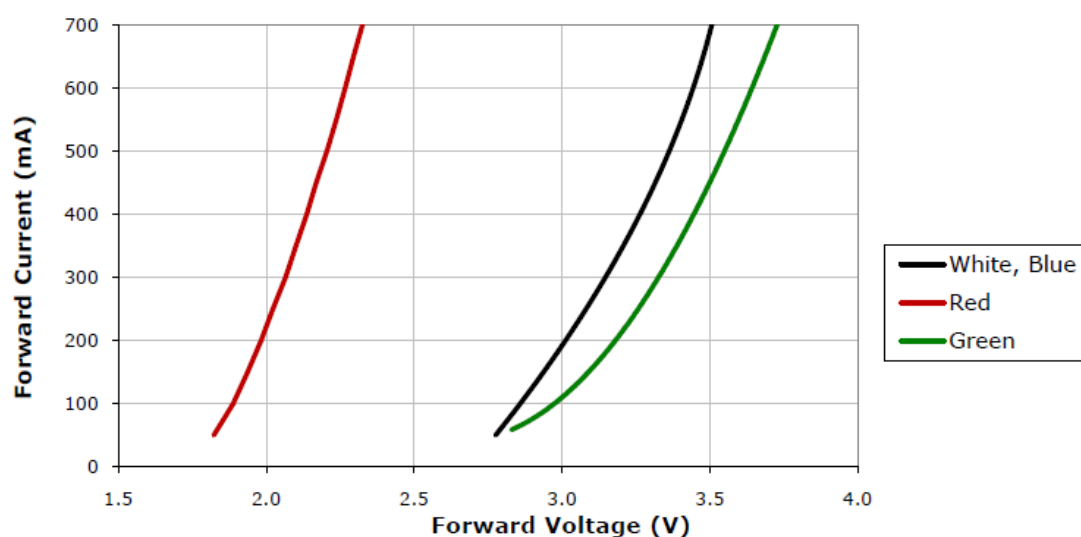


Figura 8.4.7 Curva I-V de cada LED interno (T_j=25°C)

El fabricante proporciona el comportamiento del flujo luminoso en función de la corriente directa con la unión a la temperatura de 25°C, y el comportamiento del flujo luminoso en función de la temperatura de la unión, con corriente directa de 350 mA. Estos gráficos se muestran en las figuras 8.4.8 y 8.4.9.

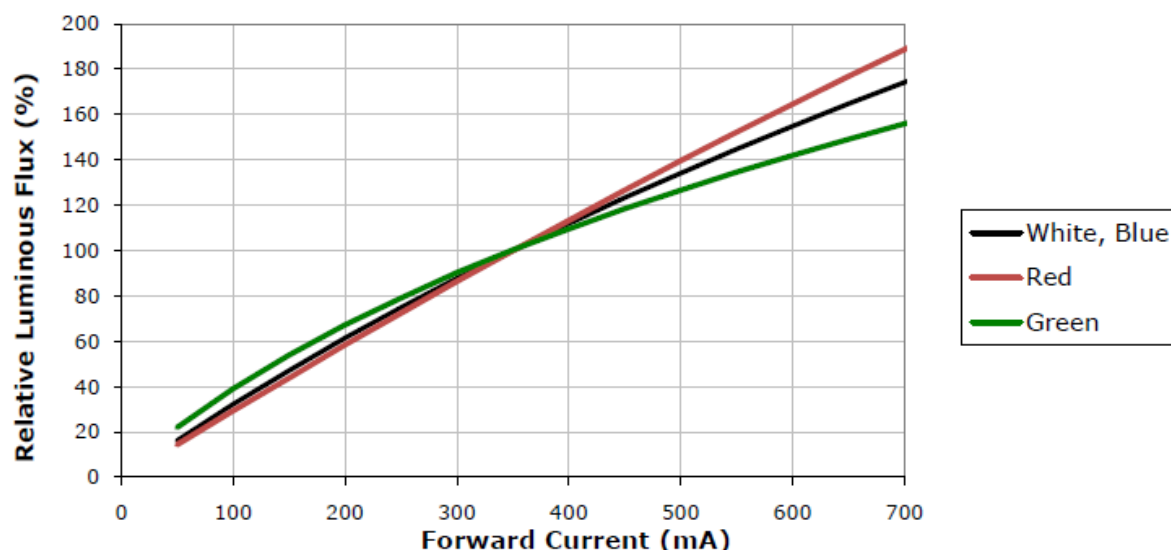


Figura 8.4.8 Flujo luminoso relativo en función de la corriente directa ($T_j=25^\circ\text{C}$)

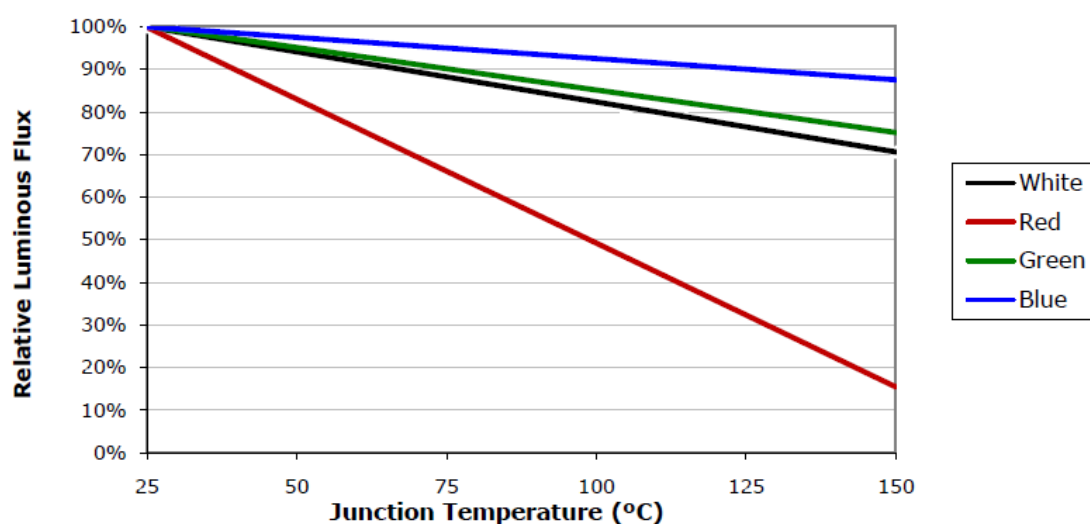


Figura 8.4.9 Flujo luminoso relativo en función de la temperatura ($I_F=350\text{ mA}$)

En la figura 8.4.8 se puede apreciar cómo aumenta el flujo luminoso al aumentar la corriente directa. También se aprecia que el punto óptimo de trabajo es a la corriente de 350 mA, ya que el aumento del flujo a partir de ese valor es menor que el aumento de corriente. En la figura 8.4.9 se ve cómo se reduce el flujo con la temperatura de la unión, y la importancia que tiene una buena refrigeración de la misma.

De los datos proporcionados por el fabricante, podemos determinar la potencia nominal consumida por los 12 diodos LEDs en el punto óptimo de funcionamiento, y la potencia máxima posible:

$I_F = 350 \text{ mA}$

- POTENCIA CONSUMIDA POR UN LED
 - Diodo rojo:
 - Diodo verde:
 - Diodo azul:
 - Diodo blanco:
 - Potencia consumida por LED

- POTENCIA TOTAL CONSUMIDA POR LOS 12 LEDs:

$I_F = I_{Fmax} = 700 \text{ mA}$

- POTENCIA CONSUMIDA POR UN LED
 - Diodo rojo:
 - Diodo verde:
 - Diodo azul:
 - Diodo blanco:
 - Potencia consumida por LED

- POTENCIA TOTAL CONSUMIDA POR LOS 12 LEDs:

El ángulo de emisión es mostrado en la figura 8.4.10:

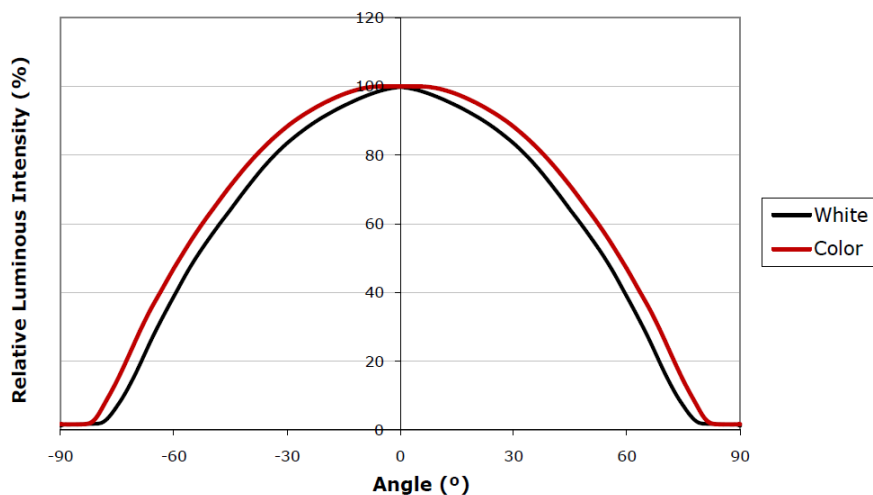


Figura 8.4.10 Flujo luminoso relativo en función del ángulo de emisión

Por último, el fabricante proporciona datos acerca de las características del flujo térmico del paquete, bombilla y PCB. Se muestran en la figura 8.4.11 y la tabla 8.4.3.

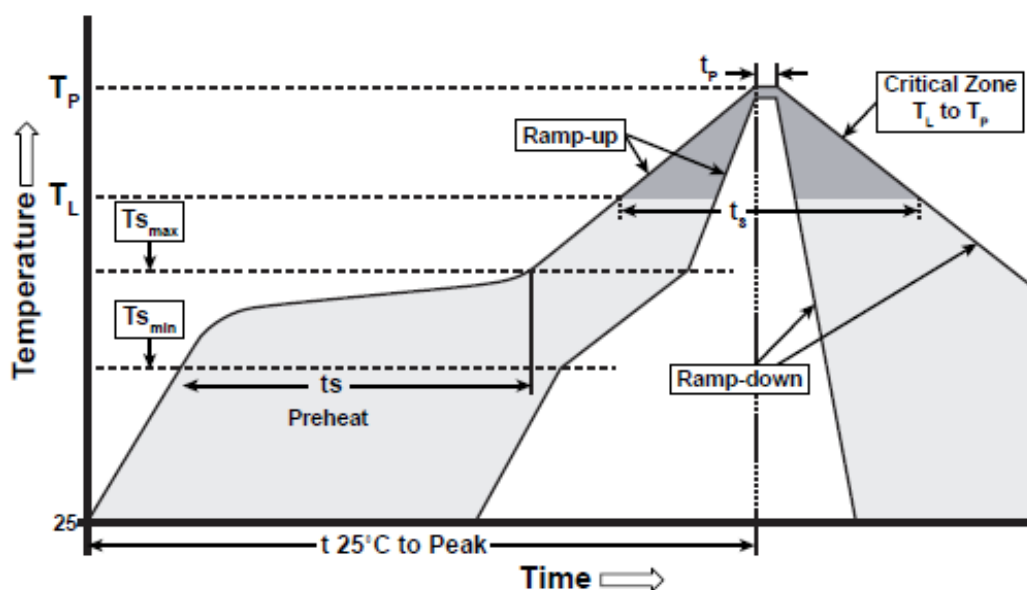


Figura 8.4.11 Características del flujo térmico

Hay que tener en cuenta que esta guía general puede no ser aplicable a todos los PCBs existentes.

Tabla 8.4.3 Datos térmicos del paquete bomilla-PCB

FUNCIONES	SOLDADURA A LA BASE DE PLOMO	SOLDADURA A LA BASE LIBRE DE PLOMO
Tasa incremento de temperatura promedio ($T_{S_{max}}$ a T_p) (Ramp-up rate)	3°C/segundo max	3°C/segundo max
Precalentamiento: temperatura mínima ($T_{S_{min}}$)	100°C	150°C
Precalentamiento: temperatura máxima ($T_{S_{max}}$)	150°C	200°C
Precalentamiento: tiempo ($T_{S_{min}}$ a $T_{S_{max}}$)	60-120 seg	60-180 seg
Temperatura límite (T_L)	183°C	217°C
Tiempo mantenido por encima de la temperatura límite (t_L)	60-150 segundos	60-150 segundos
Temperatura pico (T_p)	215°C	260°C
Tiempo máximo 5°C por encima de la temperatura pico (t_p)	10-30 segundos	20-40 segundos
Tasa de enfriamiento promedio (Ramp-down rate)	6°C/segundo max	6°C/segundo max
Tiempo de 25°C a la temperatura pico	6 minutos max	8 minutos max

Los datos del PCB correspondiente los proporciona el fabricante en forma de planos y en archivos de extensión gerber. En ellos, se especifica el material del sustrato, el grosor mínimo del dieléctrico, el acabado y los agujeros, entre otras cosas. Se adjunta estos planos en el **apéndice X**.

8.4.2 DISIPADOR

El disipador es uno de los aspectos críticos del montaje y no debe ser infravalorada su importancia en el sistema. Su no adecuación puede hacer que el sistema no cumpla con eficacia sus valores de funcionamiento y vida útil estimados. Por ello, se debe tener muy presente todas las recomendaciones del fabricante.

La primera recomendación que hace el fabricante es que el tamaño del disipador sea tan grande como sea posible si se quiere alargar al máximo la vida útil de los LEDs. Otro aspecto a tener en cuenta es el valor de potencia a disipar para el que se va a construir. Manteniendo la carcasa de partida, el fabricante GUASCH recomienda el modelo RG14015, con la configuración que se muestra en la figura 8.4.12 siguiente y 8.4.13, cortado a 260 mm:

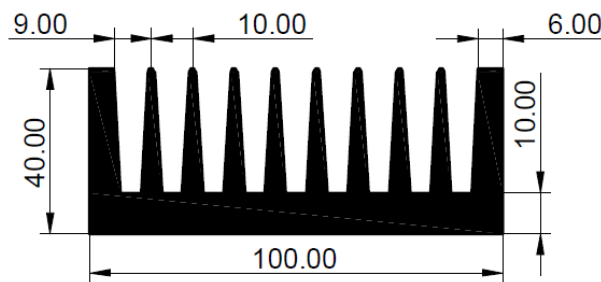


Figura 8.4.12 Modelo de disipador RG14015 del fabricante GUASCH

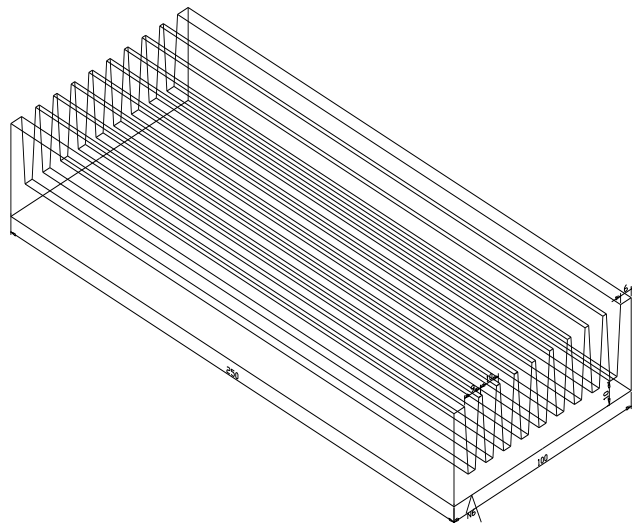


Figura 8.4.13 Plano 3D AUTOCAD del disipador

A continuación los datos generales ofrecidos por el fabricante se muestran en la tabla 8.4.4:

Tabla 8.4.4 Especificaciones generales

Dimensiones	40x100 mm
Material	6063 (AlMgSi0,5)
Perímetro	785 mm
Sección	2180 mm ²
Peso	5,89 kg/m

El fabricante nos da los valores de R_{TH} , en °C/W que aparecen en la tabla 8.4.5:

Tabla 8.4.5 Valores típicos de R_{TH}

CONVECCIÓN NATURAL	RG14015/100N	1,3825 °C/W
	RG14015/150N	0,9011 °C/W
	RG14015/200N	0,6419 °C/W
	RG14015/300N	0,4679 °C/W
CONVECCIÓN FORZADA V=6m/s	RG14015/100F	0,4608 °C/W
	RG14015/150F	0,3004 °C/W
	RG14015/200F	0,2140 °C/W
	RG14015/300F	0,1560 °C/W

Por último, el fabricante nos ofrece un gráfico que indica la variación de la resistencia térmica en función de la potencia a disipar por convección natural (figura 7.4.14) o por convección forzada (figura 8.4.15):

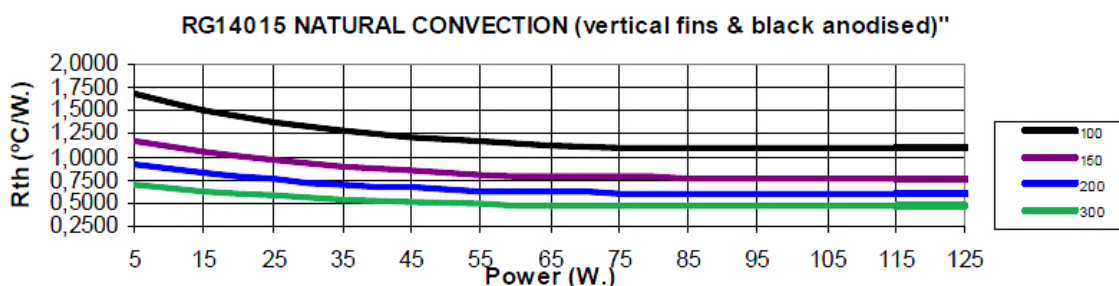


Figura 8.4.14 Resistencia térmica en función de la potencia disipada con convección natural (aletas verticales y anodizado negro)

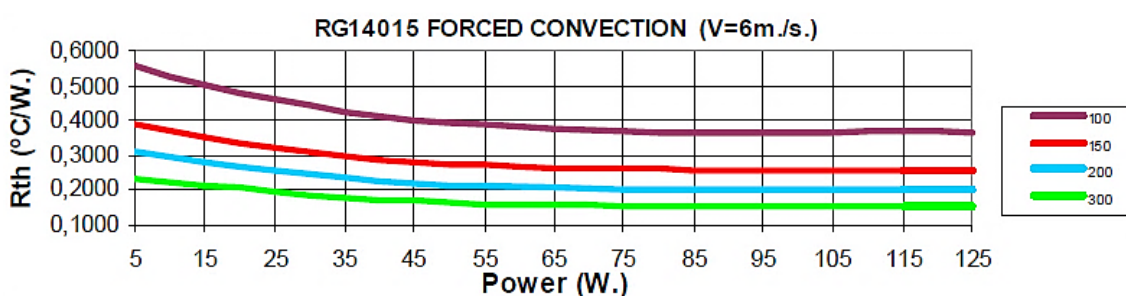


Figura 8.4.15 Resistencia térmica en función de la potencia disipada con convección forzada con velocidad de viento $V=6$ m/s

En estos gráficos se puede apreciar cómo la resistencia térmica decrece cuando aumenta la potencia hasta un determinado valor a partir del cual el valor de R_{TH} se estabiliza. También se debe señalar que el valor de la resistencia térmica del disipador con disipación por convección natural es el triple en comparación con la disipación por convección forzada con velocidad de viento de 6 m/s.

Un sistema modulable de ventiladores será instalado en el dispositivo para comprobar el comportamiento térmico del sistema y como apoyo para alargar tanto como sea posible la vida útil de la luminaria. Como se verá más adelante, este sistema consistirá en una pieza metálica que permita el acoplamiento y la conexión de dos ventiladores, uno, o ninguno.

8.4.3 VENTILADOR

El montaje experimental que se va a desarrollar es una luminaria para espectáculos partiendo de una carcasa anteriormente utilizada en un foco con bombilla halógena. Un ventilador apoyaba la ventilación de la bombilla halógena. Una vez estudiado el espacio interno existente en la carcasa, es posible la colocación de uno o dos ventiladores que apoyen la labor térmica del disipador, alargando la vida útil de los LEDs. Prácticamente toda la literatura relacionada con el calentamiento del LED indica que hay que hacer pruebas y mediciones para determinar la idoneidad del sistema. Por tanto, se dispondrá una pieza sobre la que colocar uno o dos ventiladores con el objetivo de tener distintos

datos térmicos del sistema y, de este modo, comprobar y comparar las distintas posibilidades.

El ventilador utilizado para esta tarea se muestra en la figura 8.4.16:



Figura 8.4.16 Ventilador DC de uso en MAFILED

A continuación se muestran sus características eléctricas:

- **Voltaje:** 12v DC
- **Corriente:** 0.073A (73mA)
- **Potencia:** 0.9 W
- **Medidas:** 92 x 92 x 25 mm
- **Caudal:** 47.77 m³
- **RPM:** 1700
- **DB:** 17db

8.4.4 DRIVER

Dadas las especificaciones de potencia y color, elegidas las bombillas LED, es el momento de preguntarse cómo se va a controlar el sistema. Tenemos una potencia máxima de unos 120W que serán controlados mediante cuatro canales, uno para el rojo, otro para el verde, el tercero para el azul y por último, un cuarto canal para el blanco.

Actualmente los drivers más habituales tienen una fuente de alimentación incorporada y un sistema regulador de intensidad con un canal de salida. Este tipo de drivers son muy adecuados para la alimentación y el control de LEDs blancos de un color determinado, ya que son una opción robusta y barata.

Sin embargo, la aplicación MAFILED es más exigente. El driver escogido debe permitir controlar el color y la intensidad a voluntad del usuario mediante los protocolos más habituales vistos en el capítulo 5, como son el protocolo DMX, DALI, RDM o 1-10V.

Los fabricantes de drivers han preparado tarjetas diseñadas para este tipo de aplicaciones. La opción más adecuada para MAFILED se muestra en la figura 8.4.17, y es el driver iDrive® Quattro CC, del fabricante Ist:

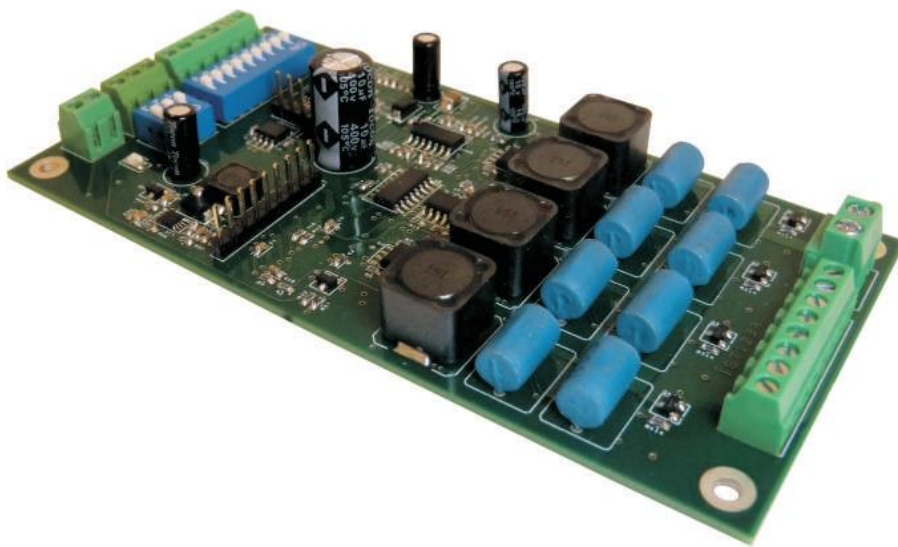


Figura 8.4.17 Driver iDrive® Quattro CC

Sus características eléctricas son las siguientes:

1. ENTRADAS:

- Rango de tensión de entrada: 10,5-50V
- Conexiones: Terminales de tornillo de 5 mm y 2 polos

2. OPCIONES DE SALIDA

- 4 Canales de alta resolución (16-bit)
- Potencia de salida: 0-77W máxima por canal
- Corriente de salida: de 100 a 1600 mA por canal
- Voltaje de salida: <1V a 48V máximo
- Conexiones a LEDs: 8 pines
- Resolución de la corriente: 8 bit, 16 bit & Master Dimmer

3. ENTRADAS DE CONTROLES

- Control de dimmer: DMX-512^a, RDM, DALI, 1-10V

- Conexiones:
 - DALI (2 pines terminales de tornillo de 3,5 mm)
 - DMX/RDM (3 pines con terminales de tornillo de 3,5 mm)
 - 1-10V (2 pines terminales de tornillo de 3,5 mm)
- Rango DMX: 0-512 via interruptores DIP
- Rango corriente: 100 a 1600 mA via 3 interruptores DIP
- RDM control total sobre funciones y sensores

4. CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES

- Temperatura ambiente de operación: -10°C a $+40^{\circ}\text{C}$
- Temperatura ambiente de almacenamiento: -20°C a $+70^{\circ}\text{C}$

5. PROTECCIONES Y SEGURIDAD

- Protección contra cortocircuito
- Protección contra polarización inversa
- Protección contra sobrecalentamiento
- Protección contra sobretensión
- Protección contra sobrecorriente
- Protección contra circuito abierto

Este driver tiene una característica extra merecedora de mención especial. El control de corriente utiliza tecnologías de controlador DC de conducción que son capaces de atenuar la salida del LED a menos de 1% sin usar PWM al controlar la corriente del LED. Este hecho hace que la luz que emiten los diodos controlados mediante este sistema sea más saludable, ya que no utiliza modulación PWM.

El driver viene encapsulado en un chasis de aluminio que facilita su fijación a la carcasa, como se ve en la figura 8.4.18:

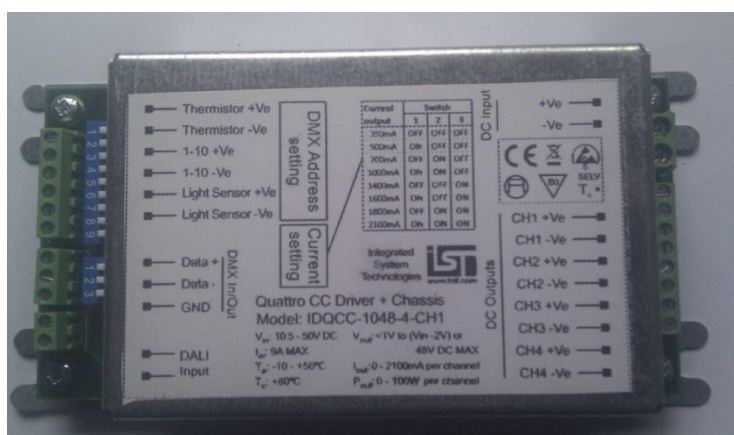


Figura 8.4.18 Driver iDrive® Quattro CC con chasis para montaje

Por desgracia, puede apreciarse que el driver iDrive® Quattro CC no tiene incluida la fuente de alimentación. Como se ha señalado en sus especificaciones, y ve en la parte superior derecha de la figura 7.4.10, debe ser alimentado con tensión continua de entre 10V y 48V.

8.4.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La fuente de alimentación debe proporcionar la máxima potencia que los diodos LEDs pueden consumir, 120W, a una tensión constante entre 10V y 48V, como ya se ha indicado. Asimismo, debe tener un tamaño adecuado a la carcasa en la que se va a instalar. Por todo esto, se opta por una fuente de alimentación similar a las fuentes de alimentación de los ordenadores portátiles, como se ve en la figura 7.4.19:



Figura 8.4.19 Fuente de alimentación de sobremesa para MAFILED

Las características de la fuente de alimentación son las siguientes:

- **Entrada:** 110-240V. AC
- **Salida:** 12V. DC.
- **Medidas:** 165 X 65 X 40mm
- **Peso:** 460Grs.
- **Potencia máxima:** 120W
- **Corriente máxima:** 10 A

8.5 DISEÑO Y MONTAJE

Elegidos los componentes de la luminaria, se procede al diseño, ensamblaje y conexionado del sistema.

8.5.1 DISEÑO

En primer lugar, se realizan planos de cada elemento en AutoCad a partir de los datos del fabricante y los planos en AutoCad de las piezas de la carcasa, ya que será imprescindible su modificación para la fijación de los componentes internos a la misma. Estos planos se muestran en el **apéndice XX**:

El espacio disponible en el interior del foco es mínimo, teniendo en cuenta los elementos que se van a conectar en su interior. Lo primero a tener en cuenta para modificar la carcasa es fijar bien el disipador con las bombillas LED, asegurando el espacio necesario para los cables que deben conectar con la tarjeta de control. En este caso se ha elegido dejar un centímetro y medio entre cada lado del disipador y la carcasa, y utilizar separadores metálicos hexagonales.

Ha resultado necesario el diseño y fabricación de dos piezas internas. La primera permitirá fijar la fuente de alimentación y la tarjeta de control, permitiendo al usuario acceder a los interruptores de ésta para configurar la luminaria. La segunda será la encargada de sostener el ventilador o ventiladores. Estas piezas se muestran en el **apéndice XX**.

Una vez resuelto el problema de fijar esos componentes se diseña la forma de conectar las entradas y salidas de control en función del espacio disponible. El usuario desea que los conectores de entrada y salida de control sean conectores XLR de 5 pines. Aunque antiguamente la utilización de cables DMX de 3 pines del tipo XLR era común, hoy en día el cable de 5 pines del tipo XLR es el estándar dentro de la industria de efectos especiales. Estas entradas se situarán convenientemente en el espacio libre que queda en la entrada de corriente.

Tras establecer la colocación de los elementos del sistema, se hacen los agujeros y ranuras a la carcasa. Es recomendable que estos agujeros hechos a la carcasa sean ligeramente mayores que los necesarios por las piezas, ya que será más fácil que unos encajen con otros si hay cierto margen de error.

Se han añadido entradas de aire laterales en la carcasa en forma de branquias para mejorar la refrigeración.

8.5.2 MONTAJE Y CONEXIÓN

1. LEDs

En primer lugar, para colocar los LEDs montados sobre su PCB en el disipador hay que utilizar silicona térmica. La función de esta silicona, como su nombre indica, es asegurar una unión térmica óptima entre las superficies de la placa de montaje y del

disipador. Es importante, ya que una mala unión puede hacer que el calor se acumule en el LED, y como se ha visto, es causa directa de su acortamiento de vida.

Una vez selladas al disipador, inicialmente, las bombillas LEDs se conectaron todas en serie: el pin 8 de cada diodo, correspondiente al terminal negativo del diodo rojo, se conectaba con el pin 1, correspondiente al terminal positivo del diodo rojo de la bombilla contigua. El pin1 del primer LED se conectaba al positivo del canal 1 y el pin 8 del último LED se conectaba al negativo del canal 1. Siguiendo este esquema, se conectaba color por color y canal por canal, como indica la figura 8.5.2.1:

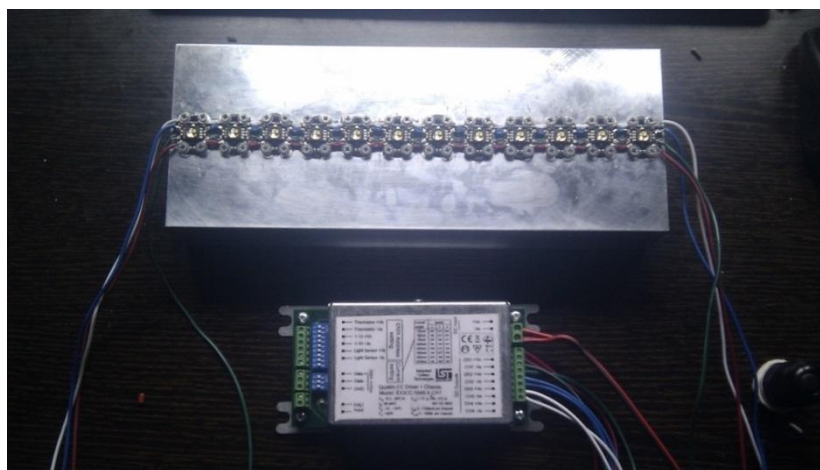


Figura 8.5.2.1 Montaje y conexión inicial de las bombillas con el disipador y el driver

Este circuito resultó no ser válido. Al conectar a la tarjeta una tensión continua, no había emisión de luz. Sin embargo, los LEDs sí emitían luz cuando eran conectados en serie hasta un máximo de 5 LEDs conectados. Al conectar el sexto LED, automáticamente dejaban de emitir debido a que la tensión que proporciona cada canal era inferior a la necesaria para polarizar los diodos.

Por tanto se optó por otra alternativa que consiste en conectar 3 ramas en paralelo, de 4 LEDs conectados en serie en cada rama, como muestra la figura 8.5.2.2:

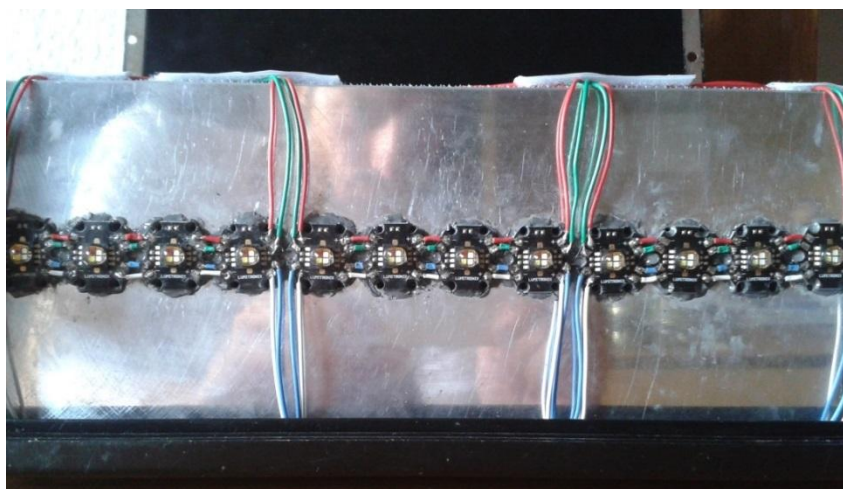


Figura 8.5.2.2 Detalle frontal de MAFILED. Conexión de LEDs

2. TARJETA DE CONTROL

Por un lado, la tarjeta de control tiene unas conexiones fijas, para alimentación eléctrica y conexión de LEDs, y por otro, tiene las conexiones de control, que pueden ser variables en función los protocolos que el usuario quiera utilizar.

En cuanto a las conexiones fijas, la tarjeta de control se conecta a la fuente de alimentación mediante los terminales +Ve y –Ve. A continuación, se encuentran los conectores positivo y negativo de cada canal que conectaremos a los terminales positivos y negativos respectivamente de cada rama paralelo de cada color.

3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para conectar la fuente de alimentación hay que cortar el cable de salida y ver la polaridad de los cables internos. Una vez claro qué cable es el positivo y qué cable el negativo, se puede conectar a la tarjeta de control.

4. VENTILADOR

El ventilador que se va a utilizar se conecta a tensión continua, tal y como se ha explicado. Su tensión coincide con la de la fuente, lo que permite que se conecte directamente a los terminales de la fuente en un paso intermedio o en los terminales +Ve y –Ve de la tarjeta de control.

5. CONTROL DMX

El estándar más común en la industria de la iluminación escénica es el control a través del protocolo DMX utilizando cables de 5 pines. La configuración de los pines 1 al 3 en un cable de 3 pines es la misma a la de los pines 1 al 3 en un cable de 5 pines.

Un conector de 5 pines (XLR-5) está configurado de la siguiente forma:

- Pin 1 = señal de referencia = revestimiento del cable (malla o masa)
- Pin 2 = señal invertida = "-" polo negativo
- Pin 3 = señal = "+" polo positivo
- Pin 4 = opcional (la utilización de este pin varía de acuerdo con el aparato en operación y los fabricantes nunca llegaron a un acuerdo sobre cómo utilizarlo. En origen era para tener feedback de los aparatos y que fuera bidireccional)
- Pin 5 = opcional (la utilización de este pin varía de acuerdo con el aparato en operación y los fabricantes nunca llegaron a un acuerdo sobre cómo utilizarlo. En origen era para tener feedback de los aparatos y que fuera bidireccional).

Para conectar el foco con la mesa de control de iluminación será necesario instalar dos conectores XLR de panel de 5 pines, macho y hembra, como los que se muestran a continuación en la figura 7.5.2.3:

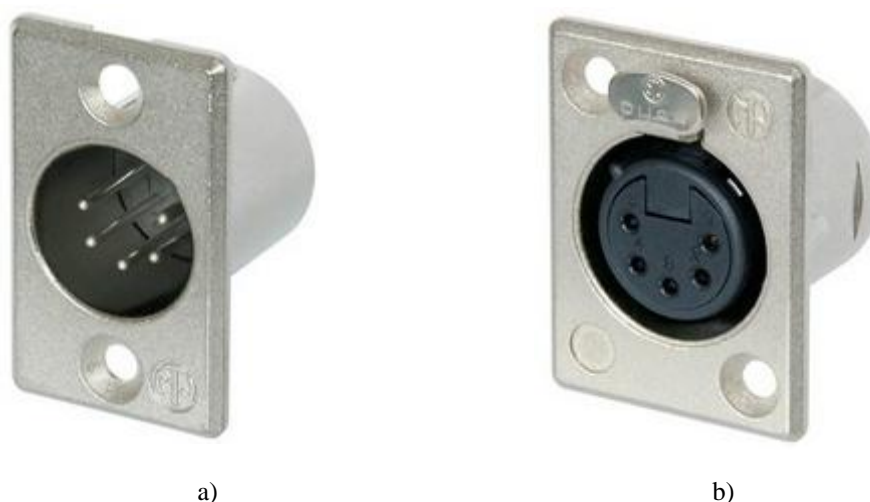


Figura 8.5.2.3 Conectores XLR de panel; (a) Macho; (b) Hembra

Estos conectores permiten que sea posible conectar un foco a otro y así sucesivamente, haciendo una red. Cada foco será controlado por separado, si su dirección DMX es diferente, o puede ser controlado conjuntamente con otros, si sus direcciones DMX coinciden. Para instalar estos elementos es importante hacer una soldadura fina, ya que evitará interferencias y con ello, un comportamiento no deseado.

La luminaria creada Mafilux tiene un peso de 4,8 kg, y mantiene las dimensiones del punto de partida:

- Alto: 190 mm
- Largo: 290 mm
- Ancho: 84 mm en la parte de conexiones y 110 mm en la salida de luz.

El esquema eléctrico se muestra en la figura 8.5.2.4:

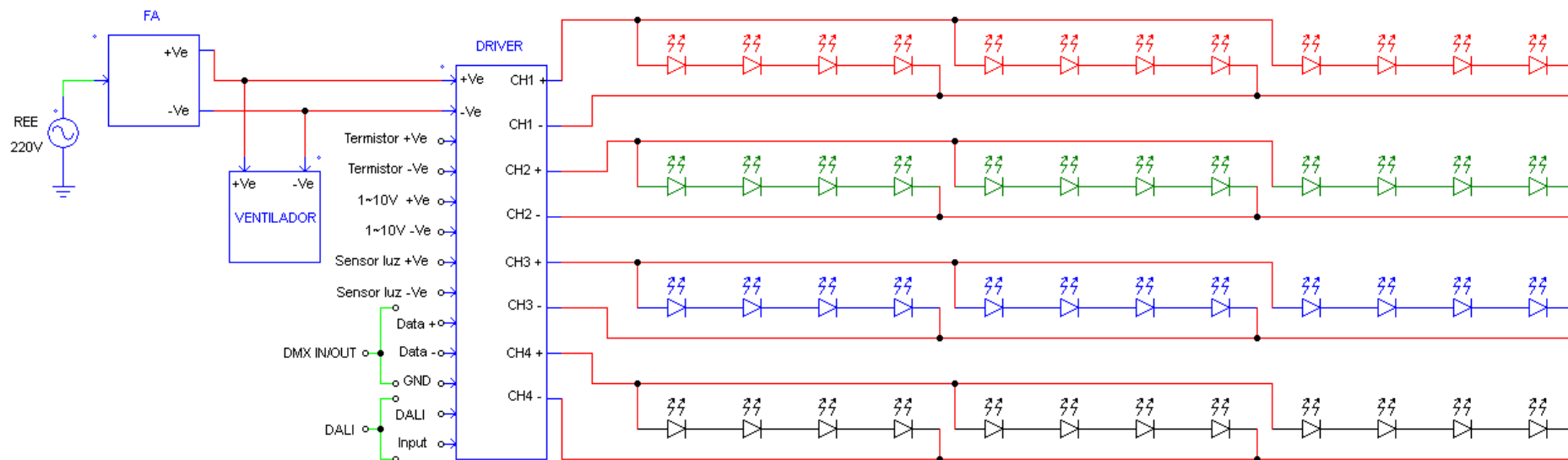


Figura 8.5.2.4 Esquema eléctrico de la luminaria

En este esquema se aprecian las diferentes posibilidades de control de LEDs del sistema: analógico o 1~10V, mediante un termistor, un sensor de luz, RDM, DMX ó DALI.

8.6 MEDICIONES Y RESULTADOS

A la vista del circuito montado, las ecuaciones que caracterizan el sistema son las siguientes:

- POTENCIAS

- TENSIONES

La tensión en cada canal depende de la corriente de circulación, tal y como nos indica el fabricante (figura 8.6.1):

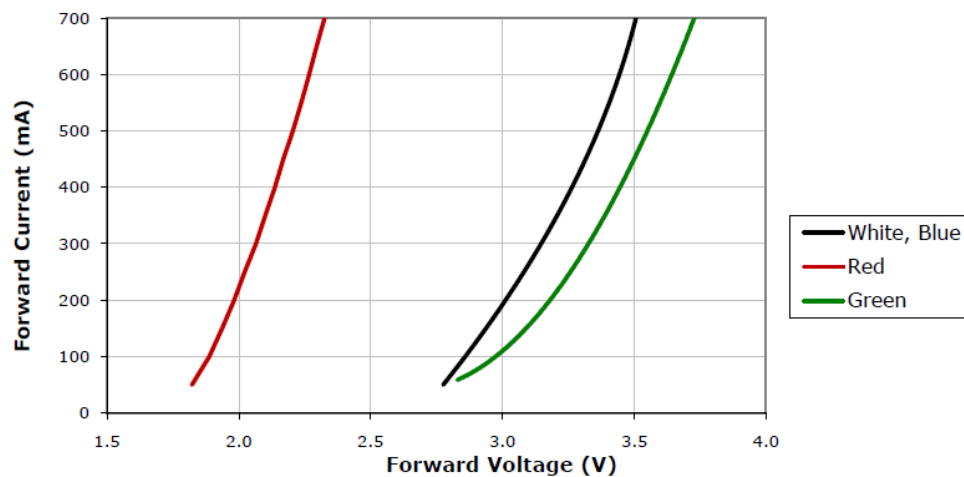


Figura 8.6.1 Curva característica I-V del LED CREE® MC-E Color

El driver proporciona una corriente constante y establece el valor de la tensión.

- CORRIENTES

Las corrientes de las ramas paralelo, que son las corrientes de circulación por cada LED, son iguales entre sí:

La corriente total de cada canal será la suma de las corrientes de cada rama. Esta corriente es fijada por el driver.

—

El tipo y la longitud del cable utilizado para conectar las lámparas LED al driver puede marcar una diferencia considerable en el rendimiento global de la instalación. El tipo de cable utilizado puede afectar la corriente máxima capaz de pasar al accesorio y la longitud del cable pueden afectar a la tensión requerida por el dispositivo LED debido a la resistencia interna del cable de LED. Cables DALI y DMX, cuando sea posible, deben ser del tipo apantallados para reducir el ruido externo o los efectos de interferencia en las instalaciones de producción . En caso de que se quieran unir canales para aumentar la corriente obtenida, el fabricante recomienda el uso del cable tipo AWG16, de 1,29 mm diámetro, y conector nominal 20A con AWG12 cableado.

- RESISTENCIA TÉRMICA

1- Entre la cápsula y el disipador

Por regla general, R_{THchs} se puede tomar entre 0.5 y 1°C/W siempre y cuando la unión que se haga entre el componente y el disipador sea directa (sin mica aislante) y con silicona termoconductora. Si esta unión se efectúa con mica y sin silicona estaremos hablando de resistencias térmicas de contacto entre 1 y 2°C/W. Si necesitamos usar mica para aislar también podemos aplicar silicona termoconductora, en cuyo caso la resistencia estaría comprendida entre 1 y 1.5°C/W. En este caso, se toma R_{THchs} el valor de 1°C/W para estar en el caso más desfavorable:

$$R_{THchs} = 1^{\circ}\text{C/W}$$

2- Entre la unión y la cápsula

$$R_{THjc} = 3^{\circ}\text{C/W diodo blanco}; R_{THjc} = 4^{\circ}\text{C/W el resto}$$

3- Entre disipador y ambiente

El disipador debe ser tan grande como sea posible, ya que mantener la temperatura baja alargará la vida útil de los LEDs y aumentará su rendimiento. El flujo luminoso se reduce conforme aumenta la temperatura en la unión (figura 8.6.2).

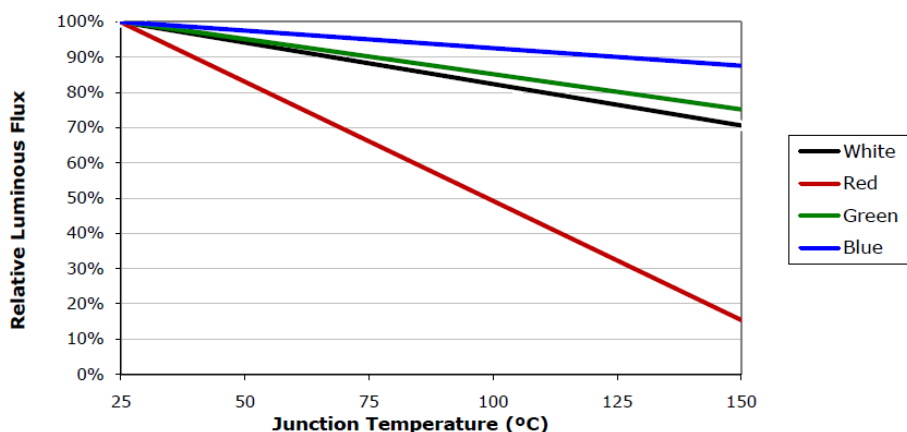


Figura 8.6.2 Flujo relativo vs temperatura en la unión

El fabricante proporciona los datos de resistencia térmica para un disipador colocado con las aletas verticales en la siguiente tabla 8.6.1:

Tabla 8.6.1 Resistencia térmica del disipador según su longitud y la ventilación

LONGITUD (MM)	RTH VENTILACION NATURAL (°C/W)	RTH VENTILACION FORZADA V=6MS (°C/W)
RG14015/100N (*1)	1,3825	0,4608
RG14015/150N (*1)	0,9011	0,3004
RG14015/200N (*1)	0,6419	0,2140
RG14015/300N (*1)	0,4679	0,1560

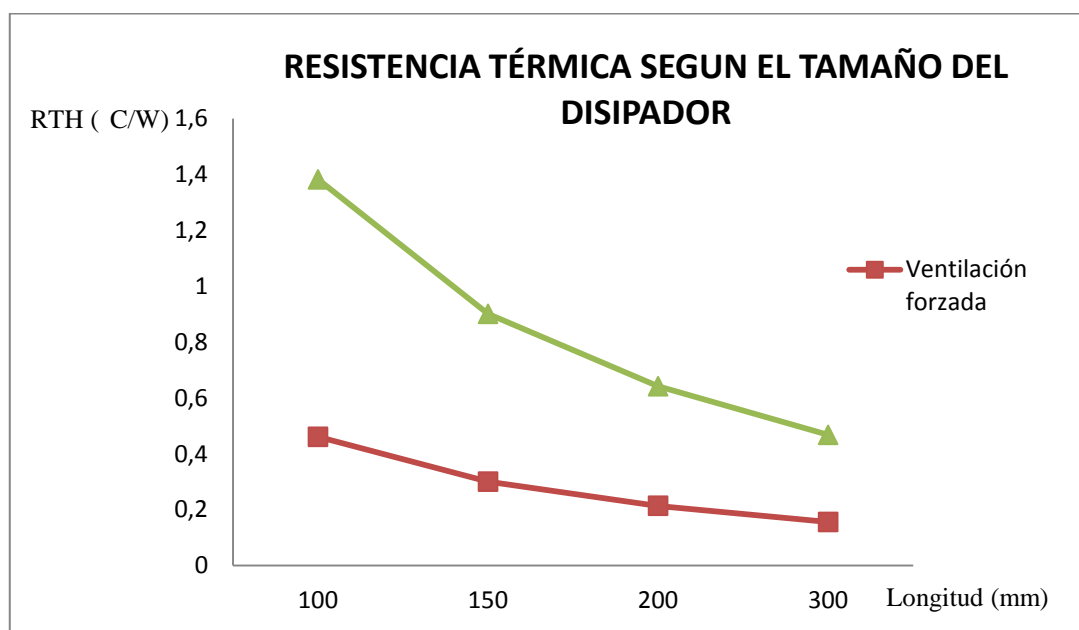


Figura 8.6.3 Resistencia térmica según la longitud del disipador

Dado que el disipador que se adapta al espacio de la carcasa es de longitud $L=260$ mm, se calcula el valor de la resistencia térmica del disipador a partir de esta gráfica, obteniéndose:

$$RTH = 0,1792 \text{ °C/W} = RTH_{hsa}$$

Este valor está ya calculado con aletas verticales en la posición que ha mostrado en la figura 7.4.12, con ventilación forzada a baja altura por lo que no hay que aplicar los factores correctores K_1 , K_2 y K_3 . El fabricante indica que la resistencia térmica del disipador decae con la potencia a disipar hasta el valor calculado como indica el gráfico de la figura 8.6.4:

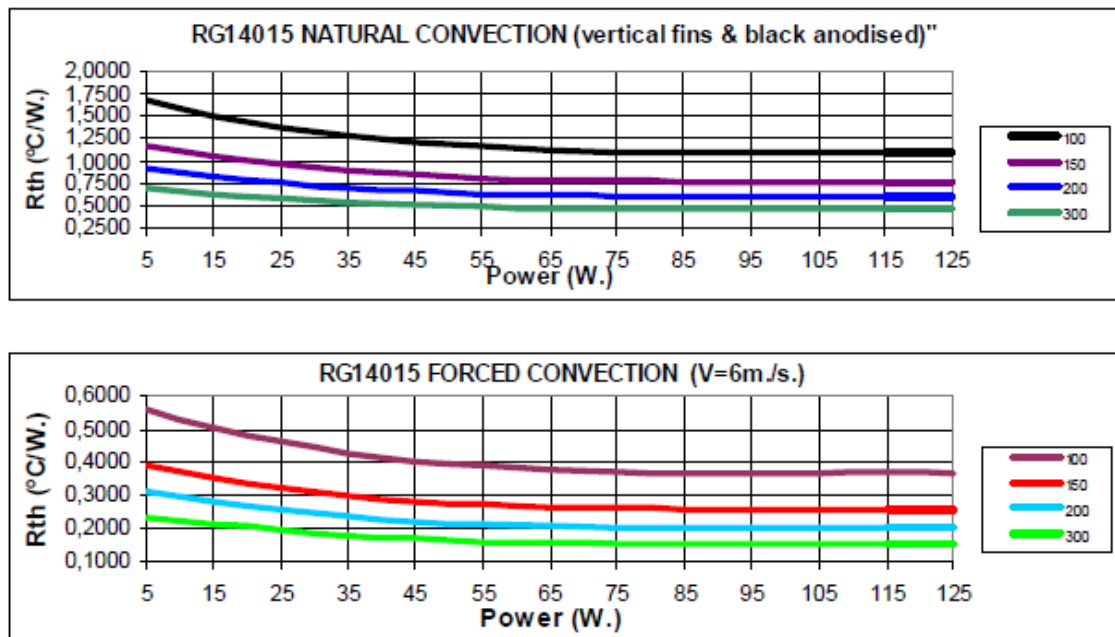


Figura 8.6.4 Resistencia térmica en función de la potencia

4- La pérdida de potencia en el semiconductor (W)

Como se indicó en el capítulo 5:

- Cables: -

Se ha empleado cables de cobre de 0,5 mm de diámetro para las ramas paralelo, es decir, los contactos de las bombillas, con un total de 4,2 m, y cables de 1 mm de diámetro para las conexiones con la tarjeta con un total de 1,8 m:



Por los cables de resistencia pasa una corriente , que es tres veces menor que la que pasa por .

- Diodos y tiristores: $W = V_0 \cdot I + I^2 \cdot R_0$

A continuación se estudian las pérdidas en los diodos, por los que circula la corriente . En primer lugar, se halla la resistencia equivalente y la tensión V_0 a partir de la curva I-V dada por el fabricante (figura 7.6.1). Si se hace un ajuste a recta de las curvas anteriores, la pendiente de cada ajuste a recta será la resistencia equivalente de cada diodo:

- $R_{0red} = 0,72 \, \Omega$
- $R_{0blue} = 1 \, \Omega$
- $R_{0white} = 1 \, \Omega$
- $R_{0green} = 1,212 \, \Omega$

En la tabla 7.6.2 se muestra la resistencia equivalente y tensión de cálculo:

Tabla 8.6.2 Resistencia equivalente y tensión de cálculo

LED	$R_0 (\Omega)$	$V_0 (V)$ I=166mA	$V_0 (V)$ I=233mA	$V_0 (V)$ I=333mA	$V_0 (V)$ I=467mA	$V_0 (V)$ I=600mA
Rojo	0,72	1,95	2	2,09	2,26	2,55
Azul/ Blanco	1	2,95	3,06	3,18	3,33	3,45
Verde	1,212	3,11	3,23	3,36	3,52	3,65

Aplicando las fórmulas anteriores se calcula la potencia perdida. En la tabla 7.6.3 siguiente se muestra la potencia perdida en cada tramo de cable y en los diodos en función de la corriente:

Tabla 8.6.3 Potencia consumida y perdida en LEDs y los cables

LED	$P_{per} (W)$ I=166 mA	$P_{per} (W)$ I=233 mA	$P_{per} (W)$ I=333 mA	$P_{per} (W)$ I=467 mA	$P_{per} (W)$ I=600 mA
Rojo	0,0198	0,039	0,0798	0,157	0,259
Azul/Blanco	0,0276	0,0543	0,111	0,218	0,36
Verde	0,0334	0,0658	0,134	0,264	0,436
Cables T1**	0,0012	0,0048	0,0098	0,0192	0,0318
Cables T2	0,00254	0,005	0,01	0,02	0,0329

** La corriente en cables T1 es el triple que en los cables T2

Los valores obtenidos se muestran en la figura 8.5.6 siguiente:

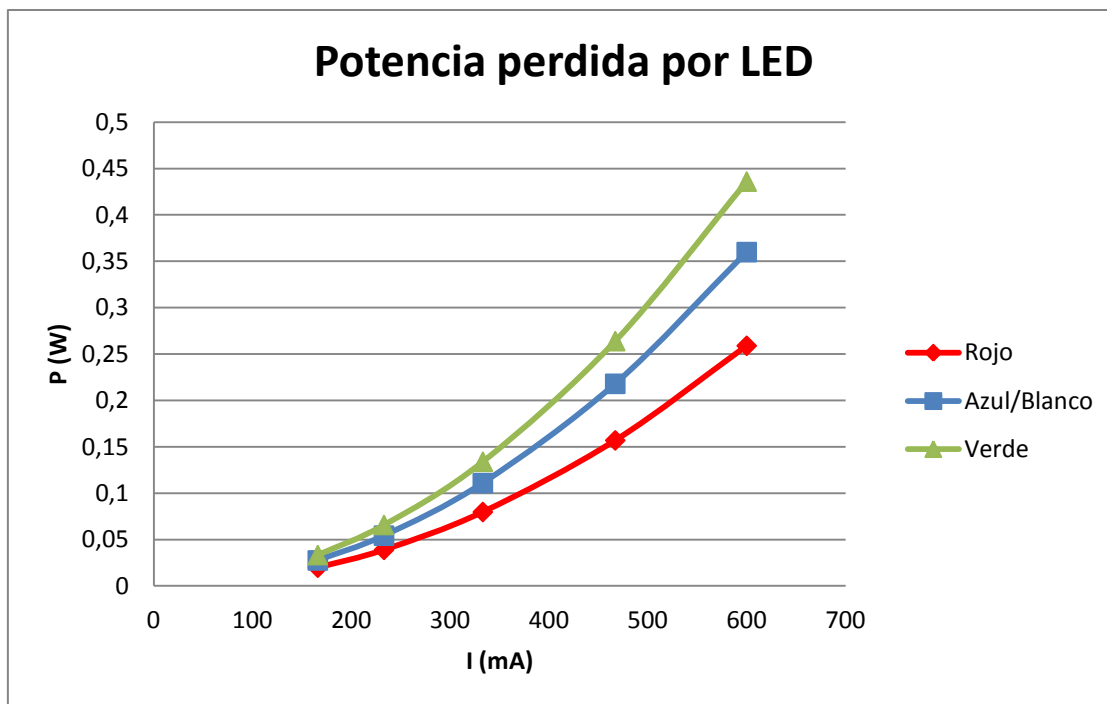


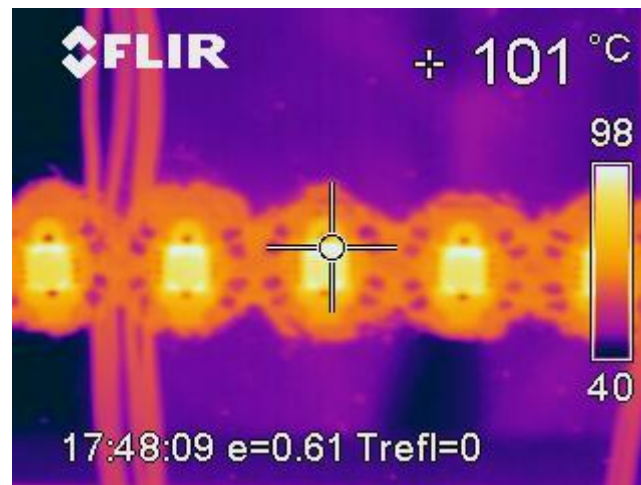
Figura 8.6.5 Potencia perdida por LED

Los datos indican un aumento del ritmo de incremento de pérdidas para corrientes de 467 mA y de 600 mA. Las pérdidas en los cables no son despreciables, ya que oscilan entre el 6% y el 12% del valor de pérdidas en los LEDs. A continuación se muestran los datos de potencia consumida P_c , potencia perdida P_p , potencia útil P_u , y rendimiento η en la tabla 8.6.4 de los 12 LEDs cuando todos los colores operan al 100%:

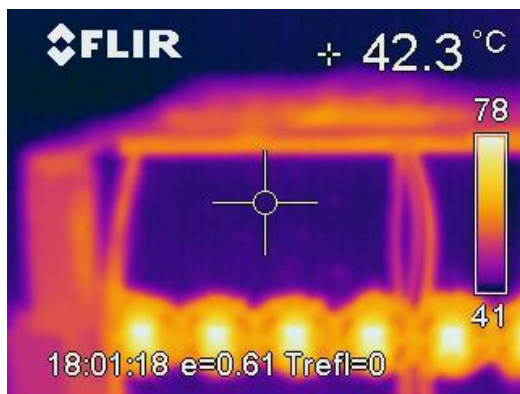
Tabla 8.6.4 Potencia total consumida, potencia perdida y rendimiento

I_F	P_p (W)	P_u (W)	P_c (W)	η (%)	T_j (°C)
I=166mA	1,305 W	21,83 W	23,135 W	94,36	62,7°C
I=233mA	2,571 W	31,73 W	34,30 W	92,51	68,2°C
I=333mA	5,250 W	47,19 W	52,44 W	89,99	83 °C
I=467mA	10,32 W	69,71 W	80,03 W	87,10	94,0 °C
I=600mA	17,04 W	94,32 W	111,36 W	84,70	101 °C

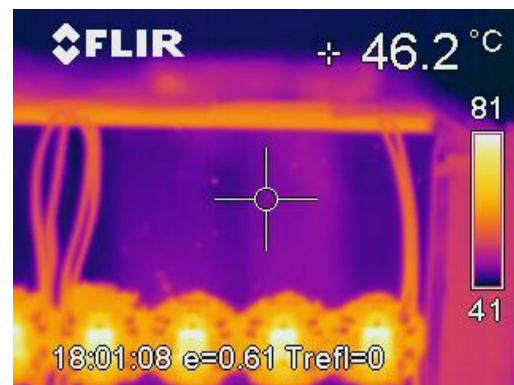
Los valores de temperatura pico alcanzada en la unión se han medido mediante cámara termográfica, un dispositivo que, a partir de las emisiones de infrarrojos medios del espectro electromagnético de los cuerpos detectados, forma imágenes luminosas visibles por el ojo humano (figura 8.6.6)



a)



b)



c)

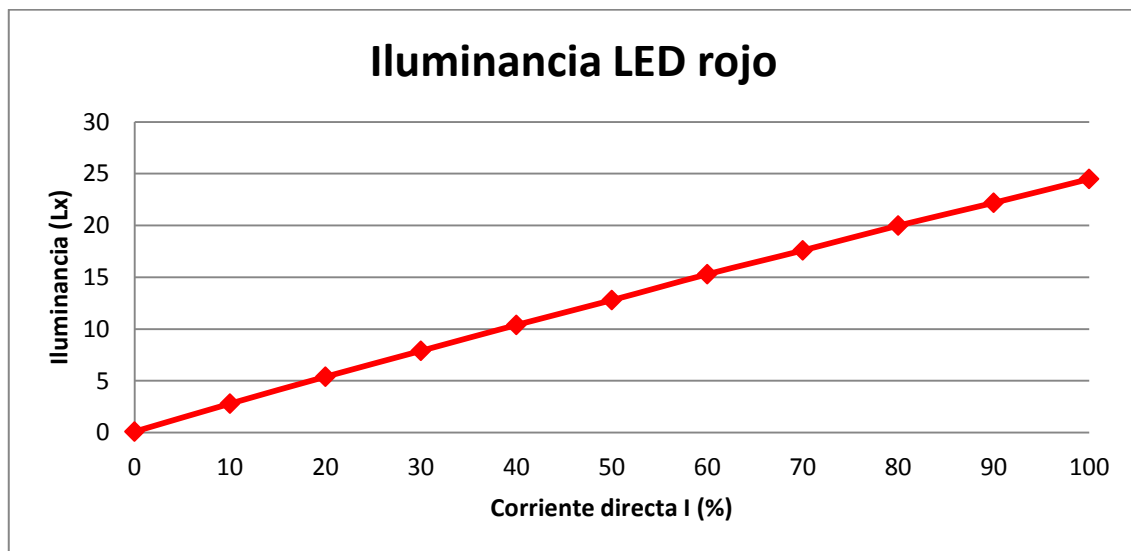
Figura 8.6.6 Temperatura a) en la unión; b) c) Disipador

En las imágenes térmicas del disipador b) y c) se aprecia que éste se encuentra a distinta temperatura en una zona que en otra. Esto se debe al distinto reparto de silicona térmica. La temperatura del disipador es mayor donde más silicona se aplicó entre disipador y PCB.

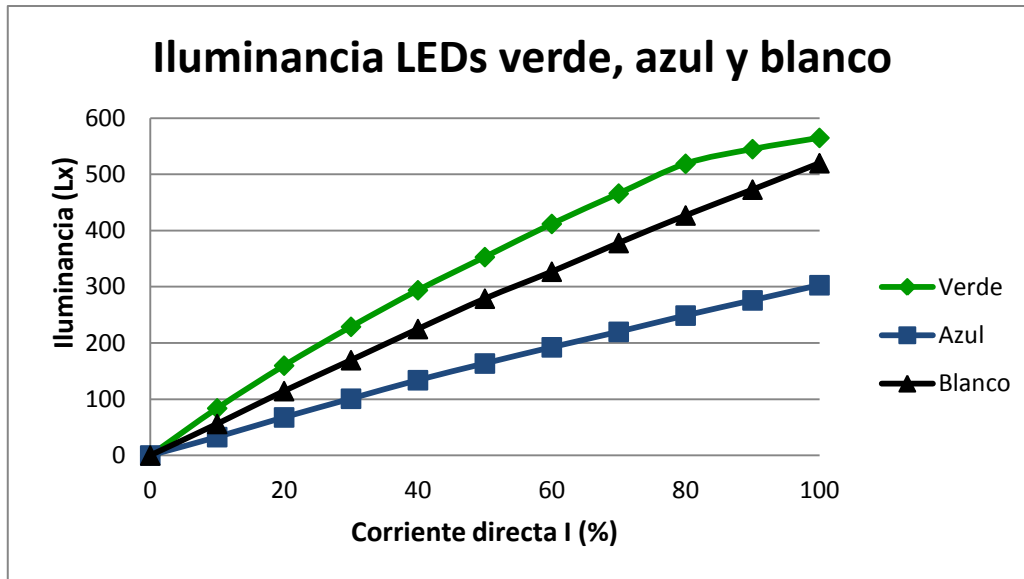
El efecto de la temperatura se ha visto que se refleja directamente en descenso del flujo luminoso en la figura 8.6.2. Se ha medido la iluminancia, la cantidad de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie, por unidad de área; también se conoce como nivel de iluminación y su unidad fundamental es el Lux (L). En primer lugar se ha medido la iluminancia en función de la variación de corriente desde el 0% hasta el 100%, con la corriente por canal limitada a — , para cada color y para el conjunto de los 4 LEDs (tabla 8.6.5) y se comprueba que su comportamiento es muy similar al de una recta (figura 8.6.7):

Tabla 8.6.5 Datos de iluminancia respecto a corriente directa

I (%)	L _{rojo} (Lx)	L _{verde} (Lx)	L _{azul} (Lx)	L _{blanco} (Lx)	L _{total} (Lx)
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	2,8	84,0	32,8	56,2	179,4
20	5,4	159,9	67,8	114,6	349
30	7,9	229	101,0	169,6	506
40	10,4	294	134,0	225	661
50	12,8	353	163,7	279	811
60	15,3	412	192,5	327	941
70	17,6	466	220	378	1070
80	20,0	519	249	427	1197
90	22,2	545	276	473	1315
100	24,5	545	303	520	1417



a)



(b)

Figura 8.6.7 Variación de iluminancia en función de la corriente directa ($I_{100\%} = 333 \text{ mA}$) (a) LED rojo; (b) LED verde, azul y blanco.

En esta figura se aprecia la característica lineal de los diodos LED. Su luminosidad es directamente proporcional a la corriente directa que circula por ellos. Este hecho, unido a la ventaja de su velocidad de respuesta, les convierte en una excelente opción para aplicaciones de regulación de luz. A continuación se muestra en la tabla 8.6.6 y en la figura 8.6.8 la variación de iluminancia de los 4 LEDs funcionando simultáneamente para dar luz blanca, en función de la corriente directa:

Tabla 8.6.6 Datos de iluminancia de los 4 LEDs encendido

I (%)	L ₁₁₆	L ₂₃₃	L _{total 333}	L _{total 467}	L _{total 600}
0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10	102,9	140,3	179,4	218	251
20	200	272	349	425	489
30	290	395	506	617	709
40	379	516	661	806	927
50	465	634	811	989	1137
60	540	735	941	1148	1320
70	614	836	1070	1305	1501
80	687	936	1197	1460	1640
90	754	1028	1315	1604	1720
100	812	1108	1417	1723	1776

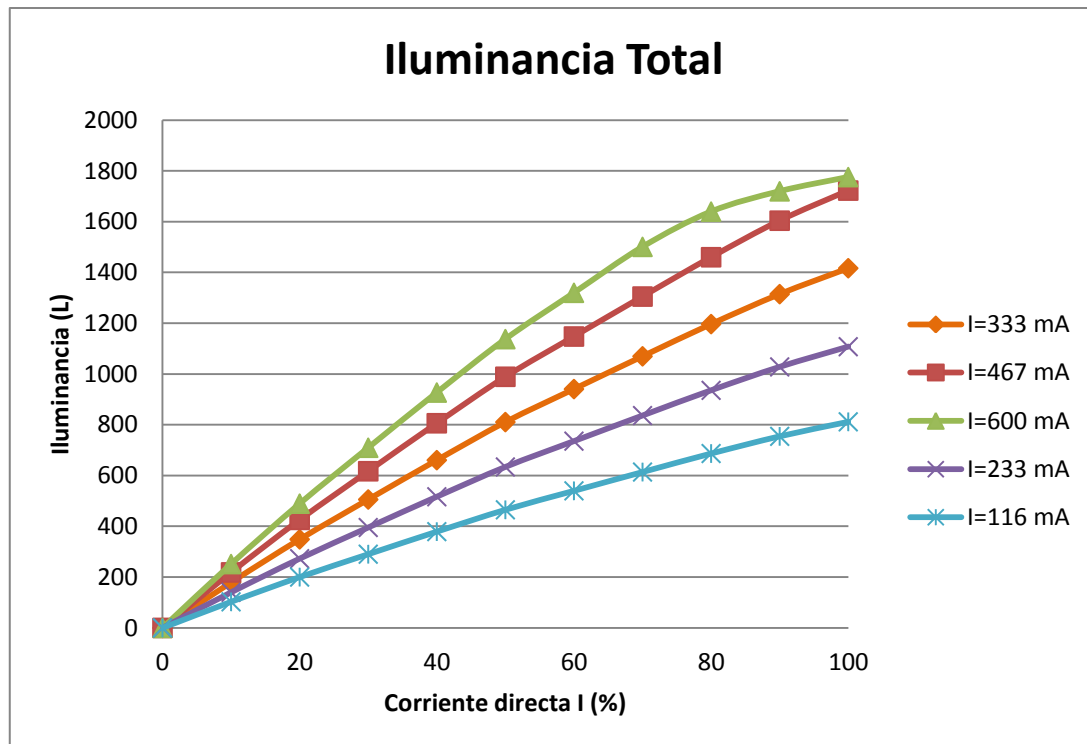


Figura 8.6.8 Variación de iluminancia de los 4 LEDs encendidos en función de la corriente directa

En esta figura se ve cómo el rendimiento esperado se ve reducido al aumentar la corriente de circulación por el efecto de la temperatura en la unión. El mayor consumo energético no se traduce en un incremento de la luz emitida. Por tanto, se puede concluir que lo más eficiente es limitar la corriente a 1 amperio por canal, 333 mA de corriente de circulación por los LEDs.

Subir la corriente hasta 1,4 amperios por canal, 467 mA de corriente de circulación, se produce un 21% más de iluminancia respecto del punto de operación de $I=333$ mA, pero incremento del consumo del 40%. Si se incrementa la corriente por canal hasta 1,8 amperios por canal, 600 mA de corriente de circulación, solo produce entre un 15% y un 4% más de iluminancia respecto del punto de operación de $I=467$ mA pero con un incremento del consumo del 28%.

8.7 PRESUPUESTOS

Los costes de los elementos empleados para la fabricación del foco aparecen en la tabla 8.7.1 siguiente:

Tabla 8.7.1 Costes asociados a cada componente de MAFILUX

COMPONENTE	MODELO	PRECIO/UNIDAD	CANTIDAD	COSTE TOTAL
BOMBILLA	LEDs CREE® XLamp® MC-E Color	13,14 €/uni	12 u	157,68 €
	PCB Star	1,76 €/uni	12 u	21,12 €
DRIVER	iDrive® Quattro CC	109 €/uni	1	109 €
DISIPADOR	GUASCH RG14015/260Rm s	125,42 €	1	125,42 €
	plano-croquis	28,65 €		
	Preparación y puesta en máquina	60 €		
	Portes	15€		
	IVA	21,77 €		
CARCASA	Preparación	20 €	1	20 €
	Piezas nuevas	15€	2	30 €
VENTILADOR	SUNNON HA9225 1W 17 dB	6,05€/uni	1	6,05€
TORNILLERÍA	4 x Separador metálico 8 mm, 14 x tornillo y tuerca 3 mm			3 €
PASTA TÉRMICA	IC Diamond Innovation Cooling	18,44 €/uni	1	18,44 €
CABLES	5 m Cable 0,5 mm y 1 mm	2,15 €/uni	4	8,6 €
ESTAÑO	Hilo de estaño	7,65 €/uni	1	7,65€
TOTAL				506,96€

Como se ha indicado al comienzo de este trabajo, el proyecto se ha desarrollado en colaboración con varias asociaciones:

- Teatro de Alcobendas: ha colaborado proporcionando elementos para pruebas de iluminación a través de un emulador DMX regulable.
- ONG Abenin por los derechos de la infancia ha colaborado donando fondos al proyecto para los componentes de la luminaria.
- Luminarias para espectáculos Stonex S.A. ha facilitado las bombillas y la tarjeta driver para el uso para este foco.

8.8 MEJORAS

En primer lugar, se puede mejorar la accesibilidad al panel de direccionamiento. El diseño e instalación de un panel digital en el que programar la dirección DMX del dispositivo mejoraría su manejabilidad, acabado y le haría más robusto.

El peso de la luminaria es de 4,8 kg debido al gran disipador que se ha instalado. Este disipador está preparado para llevar al foco al punto de máxima potencia sin que éste sufra riesgo de ruptura. Sin embargo, si su utilización se reduce al marco eficiente de potencias de entre 20W y 80W, se puede reducir el tamaño del disipador mejorando su refrigeración.

Si se desea que MafiLED proporcione una luz blanca de trabajo y que proporcione la mayor cantidad de luz con el mínimo consumo se recomienda utilizar LEDs blancos más eficientes y de mayores dimensiones. La capacidad de emitir luz de colores resta rendimiento al conjunto para darle más versatilidad.

La posibilidad de controlar MafiLED sin cables otorga muchas posibilidades. Para ello existen varias posibilidades entre las que cabe destacar el control DMX a través de Wifi mediante el driver SNAP DMX, por ejemplo, que se muestra en la figura 8.8.1:



Figura 8.8.1 Driver Wifi SNAP DMX

Para llevar a cabo el montaje es necesario que la mesa de control tenga también capacidad de enviar consignas de control a través de wifi. Este sistema permite hacer instalaciones en lugares donde el cableado es demasiado costoso, o directamente no es posible.

Si se desea tener una luminaria que trabaje totalmente sin cables es posible integrar en MafiLED una batería que proporcione energía cuando el foco esté desenchufado de la red eléctrica. El inconveniente de todas estas posibilidades es el espacio disponible en la carcasa. Un diseño de una carcasa adaptada a los componentes que va a albergar sería adecuado si se quiere llevar a cabo el desarrollo de estas ideas.

8.9 OTRAS ALTERNATIVAS COMERCIALES

El precio del foco es comparable a los focos comerciales que existen en el mercado. El principal competidor por características y dimensiones es el que se muestra en la figura 8.7.1

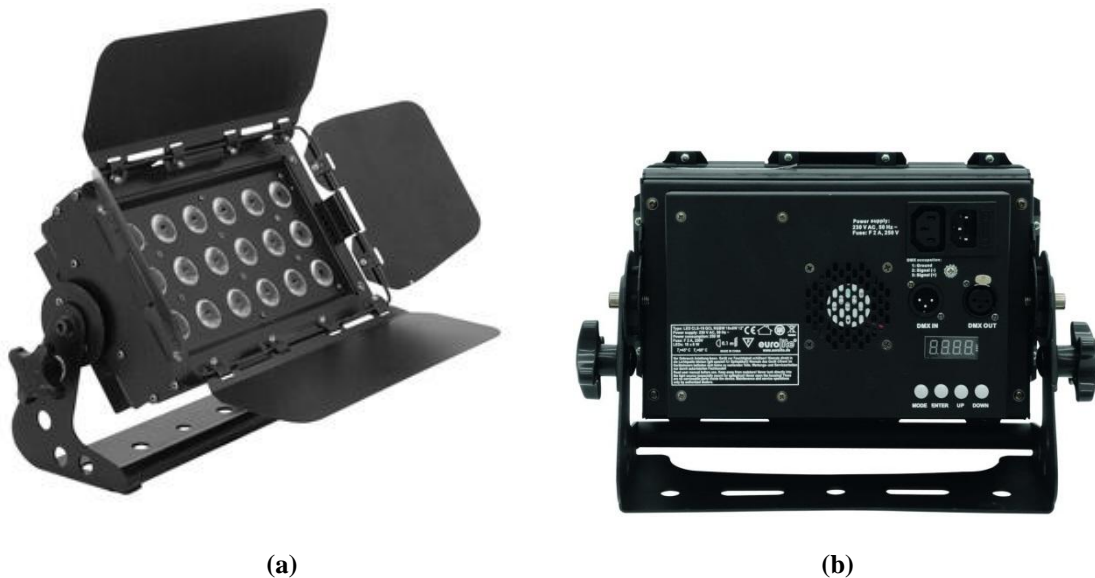


Figura 8.7.1 Eurolite LED CLS-18 QCL RGBW 18x8W 12°; (a) vista frontal; (b) vista trasera

Características:

- MODELO: LED Eurolite CLS-18
- TIPO: RGBW 18x8W 120°, 18 x 4in1 LED Thomann en los colores rojo, verde, azul y blanco; Tipo de LED: 8 W QCL, Número de LEDs: 18, ángulo de haz: 120°,
- FUNCIONES: colores estáticos, cambio de color automático, construido en los programas, dimmer, efecto, el funcionamiento maestro / esclavo estroboscópico, 4, 6, 12, 15 canales DMX, DMX-operación operación controlada o independiente, Control por sonido mediante micrófono incorporado, control DMX512 via controlador DMX. Control por sonido: mediante micrófono incorporado
- Alimentación: 230 V AC, 50 Hz,
- Consumo de energía: 250 W, canales de control DMX thomann: 4/6/12/15, conexión DMX512: 3-pin XLR
- Dimensiones (Alto x Ancho x): 170 x 340 x 220 mm
- Peso: 5 kg
- Precio: 389€

El precio es menor que en el foco fabricado, aunque la simplicidad y la adaptabilidad de los diseños a cualquier aplicación permiten dar mucha utilidad al prototipo MAFILED creado.

CAPITULO 9 – BIBLIOGRAFÍA

Archenhold G. Defining colour tunability. MondoArc (2012)

Archenhold G. LED flicker safety issues. MondoArc (2011)

Archenhold G. The right control protocol. MondoArc (2011)

Zukauskas A, Shur M, Gaska R. Introduction to solid-state lighting (2010).

<http://digilander.libero.it/calchic/centrali/lampeng2.html>

<http://www.jptinsmith.com/TableLamp.html>

<http://www.ceisp.com>:

- Jornadas Técnicas sobre LEDs. Madrid 2011 y 2012
- Requerimientos tecnicos exigibles para luminarias con tecnología LED de alumbrado exterior

http://www.sc.ehu.es/sbweb/electronica/elec_basica

http://www.uned.es/ca-bergara/ppropias/Morillo/web_et_dig/02_semiconduc/diodos.pdf

<http://www.wikipedia.org>

http://www.worldwideflood.com/ark/technology/oil_lamps.htm